

Primjena dodatnog materijala Inconel 625 za zavarivanje čelika P91 u raznorodnim spojevima

Čukman, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:912169>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jurica Čukman

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Jurica Čukman

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i koristeći se navedenom literaturom.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli tijekom pisanja ovoga rada, a posebno mentoru izv. prof. dr.sc. Ivici Garašiću i asistentici dr.sc. Maji Jurici na pruženom znanju, pristupačnosti i savjetima tijekom pisanja ovog rada.

Također se zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za materijalografiju i Laboratorija za toplinsku obradu na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojoj djevojci Heleni te svojoj obitelji na velikoj potpori, motivaciji, razumijevanju i odricanju koje su mi pružali tijekom studiranja.

Od srca vam hvala!

Jurica Čukman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JURICA ČUKMAN** Mat. br.: 0035191829

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena dodatnog materijala Inconel 625 za zavarivanje čelika P91 u raznorodnim spojevima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Inconel 625 filler metal for welding of P91 steel in dissimilar joints**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno obrazložiti problematiku zavarivanja čelika P91 koji se primjenjuje u izgradnji i reparaturi termoenergetskih postrojenja. Opisati utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline i prikazati specifične tehnologije zavarivanja i toplinske obrade s posebnim naglaskom na raznorodne spojeve. Dati prikaz prikladnih dodatnih materijala i analizirati mogućnost upotrebe žica na bazi nikla za zavarivanje spojeva čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika.

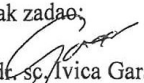
U eksperimentalnom dijelu odrediti parametre MIG/MAG zavarivanja za odgovarajuću geometriju spoja komponente od čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika. Za dodatni materijal Inconel 625 odabrati prikladan način prijenosa metala i zaštitni plin. Posebno definirati dimenzije i tehnologiju izrade međusloja te parametre i način provedbe toplinske obrade. Na zavarenom uzorku provesti razorna i nerazorna ispitivanja te u konačnici ocijeniti kvalitetu i svojstva dobivenog spoja primjenom definirane tehnologije.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
17. siječnja 2019.

Rok predaje rada:
21. ožujka 2019.

Predviđeni datum obrane:
27. ožujka 2019.
28. ožujka 2019.
29. ožujka 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O MATERIJALIMA ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA	3
2.1. Promjene svojstava materijala pri povišenim temperaturama	5
2.1.1. Pojava puzanja materijala	6
2.1.2. Ostale pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama.....	8
2.1.3. Pokazatelji mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim temperaturama	9
3. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA	11
3.1. Ugljični čelici.....	12
3.2. Niskolegirani čelici	12
3.3. Visokolegirani martenzitni čelici	13
3.4. Visokolegirani austenitni čelici.....	14
4. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA	16
4.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika P91	16
4.2. Mikrostruktura čelika P91	19
5. ZAVARLJIVOST ČELIKA P91	20
5.1. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline	20
5.1.1. Pukotine kod zavarivanja čelika P91	22
5.2. Toplinske obrade kod zavarivanja čelika P91.....	24
5.2.1. Predgrijavanje čelika P91	24
5.2.2. Održavanje međuprolazne temperature	26
5.2.3. Naknadna toplinska obrada.....	26
5.3. Dodatni materijali za zavarivanje čelika P91	27
6. RAZNORODNI SPOJEVI ČELIKA P91	29
6.1. Problematika zavarivanja raznorodnih čelika	29
6.2. Izbor postupka zavarivanja	33
6.2.1. REL postupak zavarivanja	34
6.2.2. TIG postupak zavarivanja	36
6.2.3. MIG/MAG postupak zavarivanja.....	39
6.3. Dodatni materijali	42

6.3.1.	Spojevi čelika P91 s niskolegiranim feritnim čelicima.....	42
6.3.2.	Spojevi čelika P91 s visokolegiranim austenitnim čelicima.....	43
7.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	45
7.1.	Korištena oprema za izradu eksperimentalnog rada	45
7.2.	Osnovni i dodatni materijal.....	48
7.3.	Postupak navarivanja Inconel 625 materijala na cijevi čelika P91	52
7.3.1.	Parametri navarivanja	53
7.3.2.	Toplinska obrada uzoraka	58
7.4.	Zavarivanje ploče od austenitnog čelika na navareni sloj Inconela.....	61
7.4.1.	Parametri zavarivanja.....	61
7.5.	Izrada makroizbrusaka	65
7.5.1.	Analiza makrostrukture.....	66
7.5.2.	Analiza mikrostrukture	70
7.5.3.	Mjerenje tvrdoće	73
7.6.	Analiza rezultata	76
8.	ZAKLJUČAK.....	79
9.	LITERATURA	81

POPIS SLIKA

Slika 1. Parna turbina izrađena od materijala postojanih na visokim temperaturama [2].....	3
Slika 2. Orijentacijski dijagram za primjenu materijala za rad pri povišenim i visokim temperaturama [3]	4
Slika 3. Dijagrami σ - ϵ i "zakrenuti" dijagrami puzanja za dvije povišene temperature ispitivanja za isti kotlovski čelik [5].....	6
Slika 4. Dijagram puzanja [6]	7
Slika 5. Promjena mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi [5]	9
Slika 6. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi za dvije vrste čelika [5]	9
Slika 7. Orijentacijski prikaz ovisnosti statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi za nelegirane, visokolegirane martenzitne i visokolegirane austenitne čelike [8].....	11
Slika 8. Smanjenje debljine stijenke cijevi parovoda primjenom različitih čelika [10].....	16
Slika 9. Ovisnost statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi za nekoliko vrsta čelika koji se koriste u kotlogradnji [11]	18
Slika 10. CCT dijagram za čelik P91 [13]	19
Slika 11. Mikrostruktura čelika P91 (svjetlosni mikroskop - 1000x) [13].....	19
Slika 12. Osnovna područja zavarenog spoja [15]	20
Slika 13. Tipične promjene u strukturi zavarenog spoja čelika P91 [16]	21
Slika 14. Shematski prikaz moguće orijentacije i lokacije pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91 [16].....	23
Slika 15. Pukotina IV tipa nastala nakon 200,000 sati rada na 540°C i 18 MPa [16].....	24
Slika 16. Tipičan ciklus toplinske obrade čelika P91 prije zavarivanja, za vrijeme i nakon zavarivanja [21]	27
Slika 17. Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLong-om i M.C.T. Bystram-om [22].....	32
Slika 18. REL zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [19,27].....	35
Slika 19. TIG zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [28].....	37
Slika 20. MIG/MAG zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [30,31]	40
Slika 21. Zavarivanje sa dodatnim materijalom na bazi nikla i naknadna toplinska obrada cijelog spoja [32]	43
Slika 22. Zavarivanje čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika izvođenjem prijelaznog sloja navarivanjem legure na bazi nikla [32].....	44
Slika 23. Radno mjesto s uređajem za automatizirano zavarivanje	45
Slika 24. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400	46
Slika 25. Fluke 568 IR termometar [36]	48
Slika 26. Izgled uzoraka prije navarivanja Inconel legure	49
Slika 27. Izgled ploče od čelika X5CrNi18-10	49
Slika 28. Utvrđivanje kemijskog sastava čelika X5CrNi18-10 korištenjem uređaja XRF-Olympus	50
Slika 29. Skica položaja pištolja i žice za zavarivanje prije svakog novog prolaza	52

Slika 30. Položaj uzoraka tijekom navarivanja	53
Slika 31. Upravljačko sučelje izvora struje za zavarivanje s postavljenim osnovnim parametrima	54
Slika 32. Redoslijed i broj prolaza kod navarivanja Inconel-a 625 na uzorke čelika P91	55
Slika 33. Izgled uzoraka nakon navarivanja – pogled odozgo	56
Slika 34. Izgled uzoraka nakon navarivanja – pogled s bočne strane	56
Slika 35. Indirektno mjerenje visine navarenog sloja	57
Slika 36. Četverokanalni digitalni termometar TC309 [40].....	58
Slika 37. a) Termoparovi za mjerenje temperature i uzorci stavljeni u peć za toplinsku obradu; b) korištena oprema kod provedbe toplinske obrade.....	59
Slika 38. Dijagram promjene ambijentalne temperature i temperature u materijalu uzoraka..	60
Slika 39. Položaj uzoraka za zavarivanje	61
Slika 40. Provjera međuprolazne temperature Fluke 568 IR termometrom	62
Slika 41. Redoslijed i broj prolaza kod zavarivanja.....	62
Slika 42. Uzorak 1 – prva strana; automatizirani MIG, neutralna tehnika.....	64
Slika 43. Uzorak 1 – druga strana; ručni MIG, tehnika njihanja	64
Slika 44. Uzorak 2 – prva strana; automatizirani MIG, neutralna tehnika.....	64
Slika 45. Uzorak 2 – druga strana; ručni MIG, tehnika njihanja	64
Slika 46. Izrezivanje makroizbrusaka tračnom pilom.....	65
Slika 47. Makroizbrusak uzorka 1.....	67
Slika 48. Makroizbrusak uzorka 2.....	67
Slika 49. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavara makroizbruska 1.....	68
Slika 50. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavara makroizbruska 2.....	69
Slika 51. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	70
Slika 52. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura.....	70
Slika 53. Uređaj za mjerenje tvrdoće	73
Slika 54. Raspored točaka mjerenja tvrdoće	74
Slika 55. Usporedba unesenih toplina kod oba uzorka	76
Slika 56. Usporedba srednje visine navarenog sloja	77
Slika 57. Srednje vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala čelika P91 i njegove zone utjecaja topline kod oba makroizbruska	78

POPIS TABLICA

Tablica 1. Niske, povišene i visoke temperature za tehnički važne legirne osnove [1].....	4
Tablica 2. Mehanička svojstva najčešće korištenih nelegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [3]	12
Tablica 3. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama [3] ...	13
Tablica 4. Često korišteni visokolegirani martenzitni čelici za rad pri visokim temperaturama [3]	14
Tablica 5. Najčešće korišteni visokolegirani austenitni čelici za rad pri visokim temperaturama 600 – 800 °C [3]	15
Tablica 6. Kemijski sastav P91 čelika [11]	17
Tablica 7. Mehanička svojstva čelika P91 [11].....	18
Tablica 8. Svojstva različitih vrsta čelika [22].....	31
Tablica 9. Stupnjevi miješanja za neke postupke zavarivanja taljenjem [25].....	34
Tablica 10. Karakteristike TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [29]	38
Tablica 11. Dodatni materijali prikladni za zavarivanje čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika te njihov kemijski sastav [34].....	44
Tablica 12. Karakteristike Welbee P400 izvora struje za zavarivanje [35]	47
Tablica 13. Mehanička svojstva osnovnog materijala – čelik P91 [11].....	48
Tablica 14. Kemijski sastav osnovnog materijala – čelik P91 [11]	48
Tablica 15. Točan kemijski sastav korištenog čelika X5CrNi18-10.....	50
Tablica 16. Osnovna mehanička svojstva čelika X5CrNi18-10 [37].....	51
Tablica 17. Približan kemijski sastav žice Inconel 625 [38].....	51
Tablica 18. Osnovna mehanička svojstva žice Inconel 625 [38]	51
Tablica 19. Parametri zavarivanja bilježeni prilikom svakog prolaza	55
Tablica 20. Izmjerene visine navarenog sloja	57
Tablica 21. Parametri toplinske obrade.....	59
Tablica 22. Parametri zavarivanja za svaki prolaz	63
Tablica 23. Karakteristične dimenzije zavara makroizbruska 1	68
Tablica 24. Karakteristične dimenzije zavara makroizbruska 2	69
Tablica 25. Mikrostrukture karakterističnih dijelova zavarenog spoja uzorka 1 i 2	71
Tablica 26. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV 10	74
Tablica 27. Prosječne izračunate vrijednosti tvrdoća.....	75

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezanje
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
d	%	Stupanj miješanja
E	MPa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
m	%	Udio nataljenog metala u zavaru
M_f	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura završetka martenzitne pretvorbe
M_s	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura početka martenzitne pretvorbe
n	%	Udio protaljenog osnovnog materijala u zavaru
Q	kJ/cm	Unos topline
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{m/t}$	N/mm^2	Trajna čvrstoća (statička izdržljivost)
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_{p0,2/t}$	N/mm^2	Trajna granica razvlačenja (granica puzanja)
U	V	Napon zavarivanja
v	cm/min	Brzina zavarivanja
α	10^{-6}K^{-1}	Koeficijent linearnog istezanja
γ	%	Stupanj protaljivanja
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Koeficijent toplinske vodljivosti
ρ	kg m^{-3}	Gustoća

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
A	Austenit
AC	Izmjenična struja (eng. Alternate Current)
Al	Aluminij
Ar	Argon
C	Ugljik
CO ₂	Ugljikov dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	Istosmjerna struja (eng. Direct Current)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
F	Ferit
Fe ₃ C	Cementit
He	Helij
M	Martenzit
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina (eng. Metal Active Gas)
Mg	Magnezij
MIG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina (eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikl
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
T1	Termopar 1
T2	Termopar 2
Ta	Tantal
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (eng. Tungsten Inert Gas)
V	Vanadij
XRF	Rendgenska fluorescentska spektrometrija
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U početnom, teorijskom dijelu rada dan je kratak pregled čelika koji se koriste za rad na visokim temperaturama. Detaljnije je opisan martenzitni čelik P91 te je dan poseban naglasak na problematiku zavarljivosti i promjenu mikrostrukture u području zavarenog spoja. Obradena je problematika zavarivanja raznorodnih spojeva čelika P91 te je na kraju dan prikaz prikladnih dodatnih materijala na bazi nikla za zavarivanje čelika P91 s visokolegiranim austenitnim čelicima.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje ploča čelika X5CrNi18-10 i cijevi od čelika P91 primjenom Inconel 625 dodatnog materijala. Određeni su parametri zavarivanja te su zavarena dva spoja. Nakon zavarivanja, izrezani su uzorci te je provedena analiza mikrostrukture kao i mjerenje tvrdoće. Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem doneseni su zaključci o zavarljivosti čelika X5CrNi18-10 i čelika P91.

Ključne riječi: čelik P91, raznorodni čelici, Inconel 625

SUMMARY

First, theoretical part of this thesis gives a short overview of steels for high temperature applications. Martensitic steel P91 is thoroughly described and a special focus on the weldability of this material is given. Also the change of the microstructure in the welded joint is given. The weldability of dissimilar steels was also described and at the end of this theoretical part, nickel-based filler metals for dissimilar metal welding between high alloyed austenitic and martensitic steel P91 are given.

In the experimental part of this paper, welding of X5CrNi18-10 steel plates and pipes of P91 steel with application of Inconel 625 filler metal was carried out. Welding parameters were determined and two welded joints were made. After welding, the specimens were cut out and microstructure was analyzed and hardness measurement was also performed. Analyzing the results obtained by testing, the conclusions on weldability of steel X5CrNi18-10 and steel P91 were adopted.

Key words: steel P91, dissimilar steels, Inconel 625

1. UVOD

U današnje vrijeme teži se što većoj iskoristivosti termoenergetskih postrojenja, zbog toga se projektiraju energetska postrojenja koja rade na visokim temperaturama i tlakovima. Rad u takvim uvjetima zahtijeva primjenu materijala koji su otporni na visoke radne temperature i visokotemperaturnu koroziju odnosno oksidaciju te koji mogu podnijeti visoka naprezanja zbog visokih tlakova. Drugim riječima, takvi materijali koji se koriste na visokim radnim temperaturama prvenstveno moraju biti otporni na puzanje. Postoji mnogo materijala koji se mogu koristiti u navedenim uvjetima, a kao najbolji materijali postojani na visokim temperaturama pokazuju se keramički kompoziti, legure na bazi nikla, kobalta, volframa itd. Međutim, cijena navedenih materijala je vrlo visoka, stoga se za izradu kotlovskih i energetskih postrojenja koriste visokolegirani austenitni i martenzitni čelici čija je cijena niža od navedenih legura na bazi nikla, a ujedno pokazuju i vrlo dobra svojstva na radnim temperaturama do 600°C. Zbog dobre otpornosti na puzanje, visokolegirani martenzitni čelici P91 nalaze sve veću primjenu u izgradnji i reparaturi termoenergetskih postrojenja.

Čelici P91 spadaju u „teže“ zavarljive čelike, a to se odnosi na uvjete koje je potrebno osigurati prije, za vrijeme i nakon zavarivanja. Posebno je važno prije zavarivanja čelike P91 predgrijati, održavati pravilnu međuprolaznu temperaturu te nakon zavarivanja provesti pravilnu toplinsku obradu.

U termoenergetskim postrojenjima te raznim postrojenjima kemijske ili nuklearne industrije postoje različiti uvjeti rada opreme koja je izložena različitim mehaničkim naprezanjima i različitim radnim temperaturama. U takvim uvjetima rada sve se više primjenjuju raznorodni spojevi. Zavarene konstrukcije od raznorodnih čelika definiraju se kao zavareni spojevi radnih komada gdje svaki od osnovnih materijala posjeduje različitu kvalitetu i mikrostrukturu, a time i svojstva. Iako je izvođenje raznorodnih spojeva složenije od istorodnih, moguće ih je izvesti. Potreban je pravilan odabir dodatnih materijala, kao i pravilan izbor postupka zavarivanja. Također, kod zavarivanja raznorodnih spojeva potrebno je obratiti pažnju na temperaturu predgrijavanja kao i naknadnu toplinsku obradu, budući da svaki materijal može zahtijevati drugačije parametre. Čelici P91 mogu se zavarivati s nelegiranim i niskolegiranim feritnim čelicima kao i s visokolegiranim austenitnim čelicima. Kod zavarivanja čelika P91 s

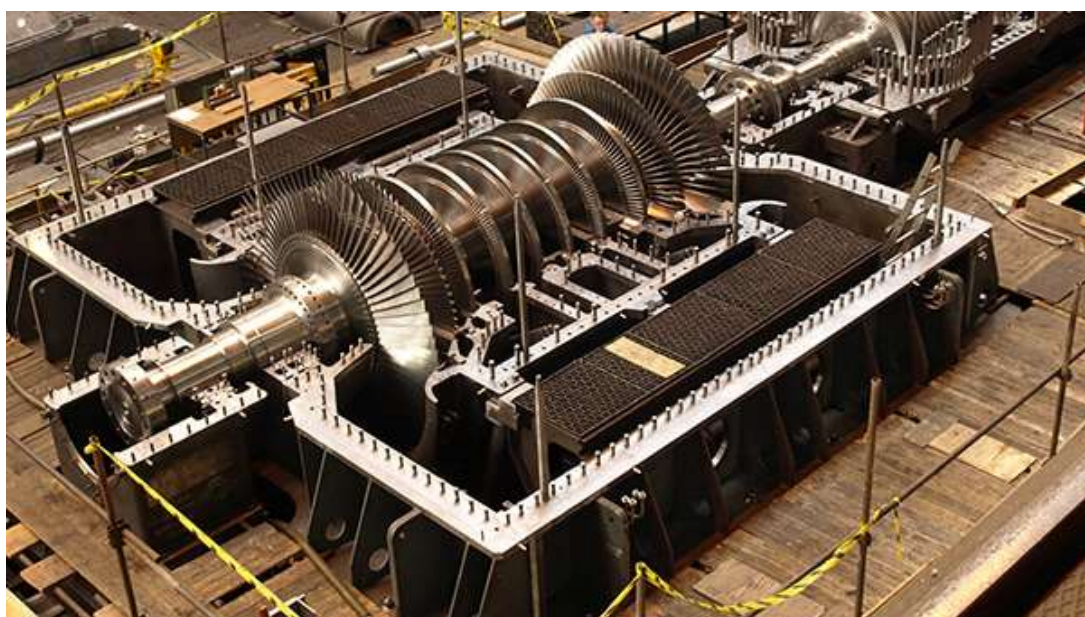
niskolegiranim čelicima može se odabrati dodatni materijal koji odgovara niže ili više legiranom čeliku, dok se kod zavarivanja čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika redovito koriste dodatni materijali na bazi nikla. Inconel 625 jedna je od takvih legura koja se može primjenjivati za zavarivanje čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika, a karakterizira ju visoka čvrstoća na visokim temperaturama, dobra obradivost i otpornost na koroziju.

2. OPĆENITO O MATERIJALIMA ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Povišene i visoke radne temperature u današnje vrijeme aktualne su kod [1]:

- toplinskih strojeva i uređaja
- u kemijskoj i procesnoj industriji
- u nuklearnim električnim centralama
- u raketama i svemirskim brodovima i sl.

Takvi materijali za rad na povišenim i visokim temperaturama najčešće se koriste za izradu dijelova parnih kotlova, dijelova uređaja za preradu nafte, kolektora pare kotlova i turbina, cijevi i oplate pregrijača pare, dijelova motora s unutarnjim izgaranjem, za izradu parnih i plinskih turbina itd. Slika 1 prikazuje parnu turbinu izrađenu od materijala postojanih za rad na visokim temperaturama.



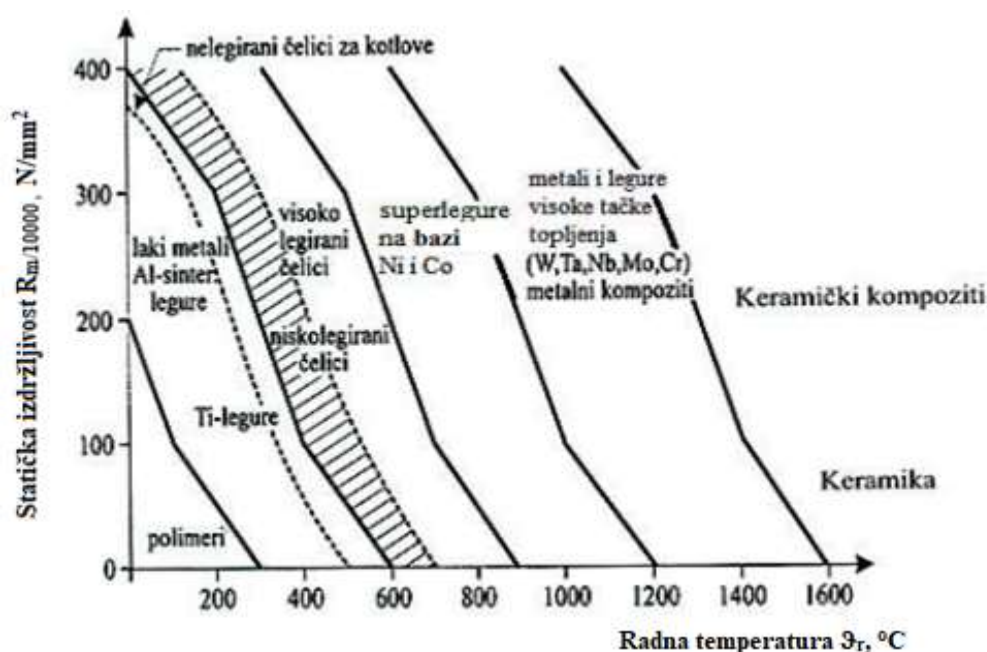
Slika 1. Parna turbina izrađena od materijala postojanih na visokim temperaturama [2]

Temperature do 180 °C kod čelika i željeznih materijala smatraju se niskima, budući da na tim temperaturama nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava. Povišenim temperaturama smatraju se temperature u rasponu od 180 – 450 °C, dok se visokim temperaturama smatraju temperature preko 450 °C jer kod te temperature počinje puzanje čelika [1]. Niske, povišene i visoke temperature za ostale tehnički važne legirne osnove prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Niske, povišene i visoke temperature za tehnički važne legirne osnove [1]

Legirna osnova	Talište čistog metala ϑ_t , °C	Niske temperature < °C	Povišene temperature od °C...do °C	Visoke temperature > °C
Al	660,37	-40	-40 ... +100	+ 100
Cu	1084,5	66	66 ... 270	270
Ti	1672	215	215 ... 505	505
Ni	1455	160	160 ... 420	420

Slika 2 prikazuje orijentacijski dijagram za primjenu materijala za rad pri povišenim i visokim temperaturama. Uočava se da su keramika i keramički kompoziti materijali koji su pogodni za rad na najvišim temperaturama, dok se čelici koriste do temperatura koje iznose oko 700 °C. Polimerni materijali nisu pogodni za rad na povišenim temperaturama.



Slika 2. Orijetacijski dijagram za primjenu materijala za rad pri povišenim i visokim temperaturama [3]

Važnost daljnjeg unapređivanja materijala za rad pri visokim temperaturama vidi se iz činjenice da je danas materijal jedini ograničavajući faktor daljnjem povišenju radne temperature, i to ili zbog naprezanja ili zato što mu je primjena preskupa [3].

Već je rečeno da u termoenergetskim postrojenjima (parni kotlovi) te plinskim i parnim turbinama vladaju povišene ili visoke temperature. Osim što su uređaji i komponente u radu podvrgnuti visokim temperaturama, neki od uređaja su i pod dodatnim utjecajem naprezanja. Zbog visokih temperatura i dugotrajnog djelovanja statičkog naprezanja dolazi do nepovratne deformacije materijala – proces puzanja. Osim pojave puzanja, na visokim temperaturama djeluje i okoliš, te uz temperature > 600 °C izaziva kemijsku koroziju – oksidaciju. Iako je poželjno da se čelici opiru tom djelovanju, još nije moguće osigurati istodobnu otpornost na puzanje i otpornost na visokotemperaturnu koroziju. Upravo ta dva djelovanja dijele čelike za rad pri povišenim i visokim temperaturama u dvije glavne skupine [3]:

- toplinski postojane – visoke otpornosti na puzanje i mehaničke nosivosti, ali slabije vatrootpornosti,
- vatrootporne – visokopostojane na ogaranje, ali razmjerno slabe nosivosti.

Treba li se dati prednost jednom ili drugom zahtjevu, prosudba je konstruktora. Problem kod izbora optimalnog materijala je činjenica da će se neki uređaji morati tako konstruirati, dakle i tako izabrati materijal, da oni budu u stanju raditi bez prekida godinama pa prema suvremenim zahtjevima i više od dvadeset godina. U skladu s tim treba računati da se u takvim slučajevima neće moći izvoditi nikakvi remontni radovi pa i materijal ovdje mora pridonijeti potpunoj sigurnosti rada. Izraženiji problem će biti, što je viša radna temperatura uređaja, predviđena trajnost i više radno naprezanje [3].

2.1. Promjene svojstava materijala pri povišenim temperaturama

Kako bi konstruktori pravilno dimenzionirali dijelove za rad na visokim temperaturama, koriste dijagrame ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi. Do radnih temperatura iznad kojih počinje puzanje dijelovi se preračunavaju prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim i kratkotrajnim opterećenjem. Iznad granične temperature od 450 °C, veličine koje se koriste za proračun i izbor materijala su granica puzanja i statička izdržljivost. Tipične pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama, osim puzanja i smanjenja statičke izdržljivosti su: sniženje granice razvlačenja,

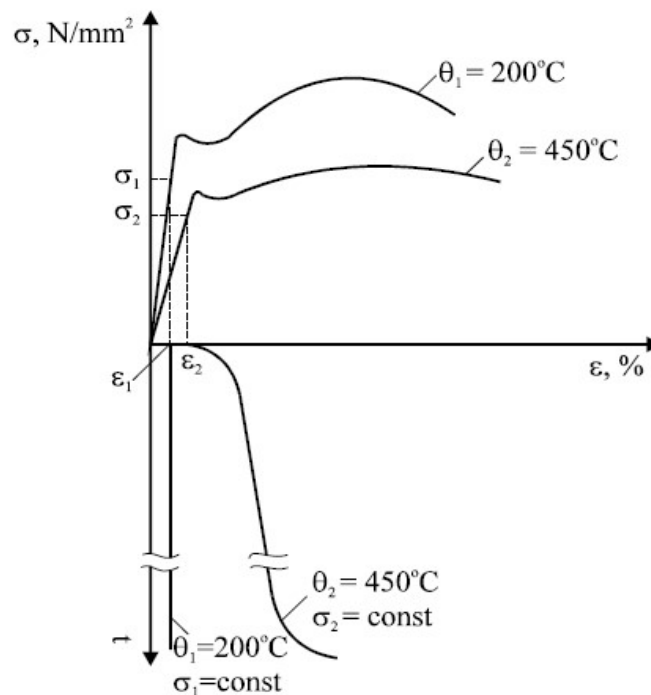
vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz istovremeno povećanje istežljivosti, suženja poprečnog presjeka i žilavosti [4].

2.1.1. Pojava puzanja materijala

Puzanje materijala je spora deformacija materijala koja nastaje uslijed djelovanja dugotrajnog konstantnog opterećenja pri povišenoj temperaturi. Puzanje materijala je toplinski aktivirani proces pa nastupa u temperaturnom području:

$$T > 0,3 \times T_{\text{tališta}} \quad (1)$$

Zbog toga puzanje kod polimernih materijala nastupa već pri sobnoj temperaturi, a kod čelika npr. pri temperaturama $\vartheta > 400 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Slika 3 prikazuje kvalitativne dijagrame σ - ε i „zakrenute“ dijagrame puzanja za čelik na povišenim temperaturama.

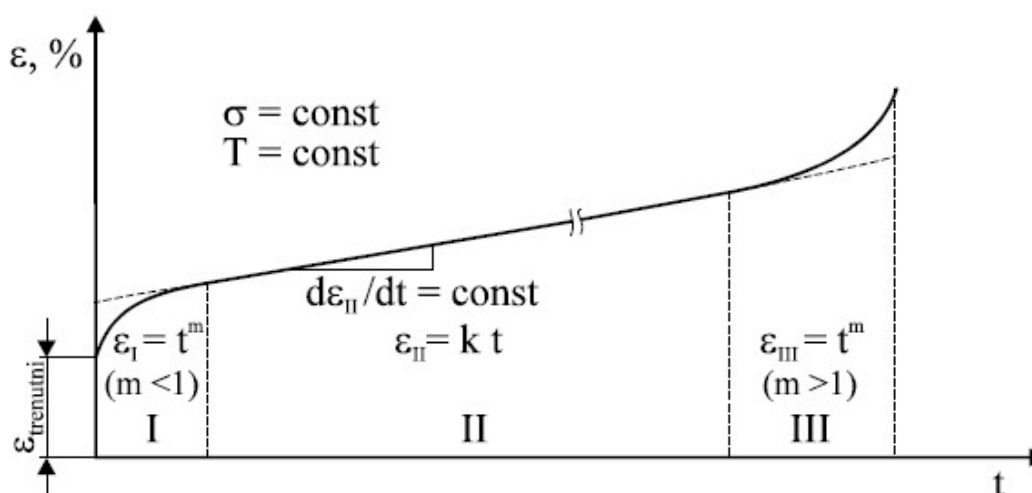


Slika 3. Dijagrami σ - ε i "zakrenuti" dijagrami puzanja za dvije povišene temperature ispitivanja za isti kotlovski čelik [5]

Pretpostavlja se da su dijagrami dobiveni ispitivanjem dvije epruvete od kotlovskog čelika na povišenim temperaturama ϑ_1 i ϑ_2 te da je temperatura ϑ_2 viša od temperature ϑ_1 . Također, pretpostavljeno je da je epruveta od istog čelika napregnuta dulje vrijeme na temperaturi $\vartheta_1 = 200$

°C nekim konstantnim naprežanjem σ_1 koje je manje od granice razvlačenja R_e za tu temperaturu. Onog trenutka kad je epruveta napregnuta naprežanjem σ_1 ona se istegnula za iznos ε_1 . Daljnjim praćenjem istezanja tijekom vremena vidljivo je da se istezanje više nije povećavalo tj. nije došlo do pojave puzanja čelika, što je vidljivo u „zakrenutom“ dijagramu na slici 2. Druga epruveta napravljena od identičnog čelika napregnuta je naprežanjem σ_2 koje je također niže od R_e na temperaturi $\vartheta_2=450$ °C, isto tako dugo vremena. Praćenjem produljenja u „zakrenutom“ dijagramu vidi se da ono tijekom vremena raste te da na kraju dolazi do loma epruvete [6].

Slika 4 prikazuje „normalni“ dijagram puzanja u kojem os apscisa sadrži vrijeme izraženo u satima, dok ordinata sadrži istezanje izraženo u postocima.



Slika 4. Dijagram puzanja [6]

Iz slike 4 vidljivo je da je dijagram puzanja podijeljen u tri karakteristična dijela, odnosno proces puzanja sastoji se od tri stadija [4]:

- I – početni stadij: u tom stadiju krivulja ne počinje iz ishodišta dijagrama budući da je deformacija nastala istog trenutka kad je ispitni uzorak opterećen. Prvi stadij u početku karakterizira povećana i promjenjiva brzina puzanja $\Delta\varepsilon/\Delta t$ (nelinearan odnos).
- II – stadij puzanja: još se naziva i stadijem približno konstantnog gradijenta (brzine) puzanja. U tom stadiju je dijagram približno pravac s koeficijentom smjera $\Delta\varepsilon/\Delta t$ -brzinom puzanja. Nagib tog „pravca“ govori o otpornosti materijala prema puzanju. Ako je nagib strmiji, sklonost puzanju je veća, i obratno. Kada bi bio paralelan s osi

apscisa ($\Delta\varepsilon/\Delta t=0$), to bi značilo da je materijal potpuno otporan na puzanje. Drugi stadij vremenski traje puno dulje nego prvi i treći stadij.

- III – stadij puzanja: ovaj stadij puzanja naziva se i završni stadij, a karakterizira ga povećanje brzine puzanja i nepostojanje linearne ovisnosti između istežanja i vremena. Završni stadij završava lomom epruvete.

Puzanje materijala zasniva se na pokretljivosti atoma te se pojačava s porastom temperature i sa prisutnošću većeg broja defekata rešetaka. Toplinski aktivni procesi izmjene mjesta atoma (difuzija) su također od velikog značaja. Pri povišenim i visokim temperaturama u strukturi materijala nastupaju sljedeće promjene [5]:

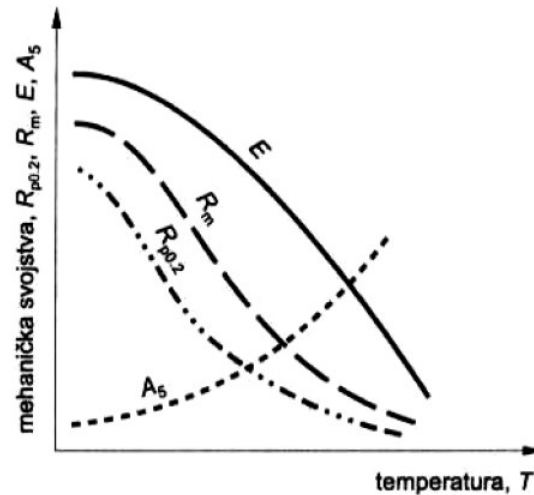
- koncentracija praznih mjesta (vakancija) raste te olakšava difuziju,
- penjanje i klizanje dislokacija stvara nove klizne sustave atomnih ravnina,
- deformiraju se granice zrna, a taj je proces s porastom temperature sve lakši,
- strukturna stabilnost se snižava – hladno deformirani metal se oporavlja i/ili rekristalizira, a precipitacijski očvrstnut (ostaren) postaje prestaren,
- površine strojnih dijelova reagiraju s okolišem – problemi korozije i ogaranja.

Brzinu puzanja moguće je smanjiti na nekoliko načina [6]:

- korištenjem materijala s kovalentnom vezom i visokom temperaturom tališta,
- kristalnom strukturom materijala s malim koeficijentom samodifuzije (npr. γ -Fe umjesto α -Fe),
- legiranjem materijala onim legirnim elementima čiji atomi prvenstveno segregiraju na mjestima penjanja dislokacija,
- upotrebom materijala s velikim zrnima ili čak monokristalnog materijala,
- korištenjem materijala koji sadrže čestice jednoliko raspoređene u kristalima,
- korištenjem materijala s česticama precipitiranim po granicama zrna.

2.1.2. Ostale pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama

Već je spomenuto da u materijalima koji su izloženi visokim temperaturama dolazi do promjene mehaničkih svojstava. Granica razvlačenja (R_e , $R_{p0,2}$), vlačna čvrstoća (R_m) i modul elastičnosti (E) se snižavaju, dok se istovremeno povećava istežljivost (A) i žilavost. Navedene promjene mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi prikazane su na slici 5.

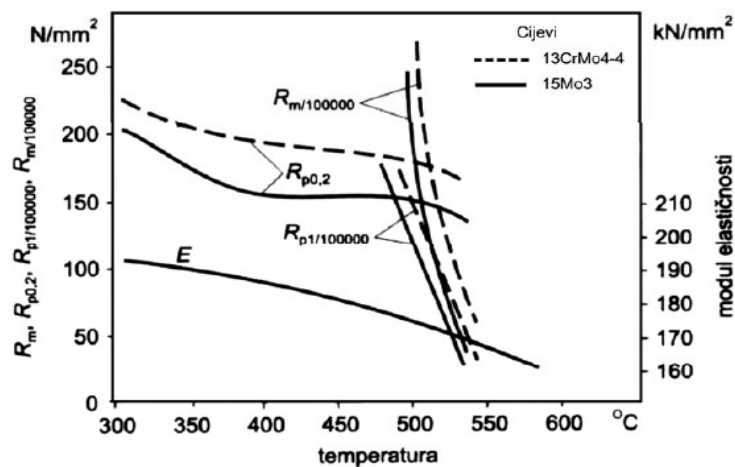


Slika 5. Promjena mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi [5]

Općenito se može reći da značajke koje karakteriziraju otpornost materijala (R_e , $R_{p0,2}$, R_m i E) se smanjuju, dok se značajke koje karakteriziraju deformabilnost materijala (A , Z) povećavaju s porastom temperature. Također, tijekom rada na visokim temperaturama smanjuje se dinamička izdržljivost ili uopće ne postoji, odnosno dolazi do loma kod određenog broja promjena opterećenja.

2.1.3. Pokazatelji mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim temperaturama

Ranije je navedeno da konstruktori za pravilan odabir materijala koji će se koristiti na visokim temperaturama moraju koristiti dijagrame ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi. Takav dijagram za dvije vrste čelika prikazan je na slici 6.



Slika 6. Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi za dvije vrste čelika [5]

Iz dijagrama koji je prikazan na slici 5 vidljivo je da su za proračun i izbor materijala za rad na povišenim i visokim temperaturama bitna sljedeća mehanička svojstva [1]:

- $R_{p0,2}$ – vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi,
- R_m – vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi,
- E – vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi,
- A – vrijednost istežljivosti pri radnoj temperaturi,
- $R_{p1/t}$ ($R_{p0,2/t}$) – trajna granica razvlačenja (granica puzanja), odnosno to je ono statičko vlačno naprezanje koje će pri konstantnoj povišenoj ili visokoj temperaturi izazvati trajnu deformaciju od 1 % (0,2%),
- $R_{m/t}$ – trajna čvrstoća (statička izdržljivost) pri $\vartheta = \text{konst}$, odnosno to je ono trajno vlačno naprezanje koje će (uz statički karakter naprezanja) izazvati puknuće nakon zadanog trajanja (t) i zadanog vlačnog naprezanja σ ,
- $R_{DVM, \%h}$ – granica brzine puzanja pri zadanoj $\vartheta = \text{konst}$ nakon zadanog vremena t . To je ono naprezanje koje će pri nekoj zadanoj povišenoj temperaturi uz statičko konstantno vlačno naprezanje izazvati neku zadanu brzinu puzanja u zadanom vremenskom intervalu.

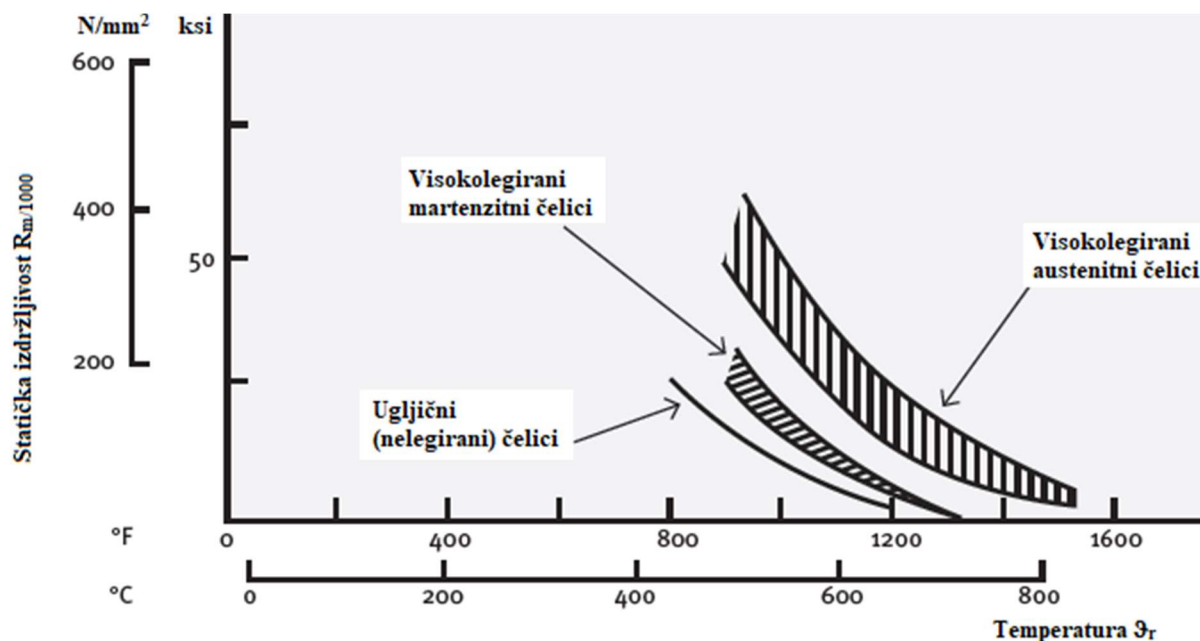
Uz gore navedene pokazatelje još su važni, ali se obično ne kvantificiraju: otpornost relaksaciji, dinamička izdržljivost pri povišenoj ili visokoj temperaturi, toplinski umor površinskih slojeva, otpornost na koroziju itd.

3. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Čelici namijenjeni za rad na povišenim i visokim temperaturama prema temperaturnom području primjene i mikrostrukturi dijele se na [7]:

- ugljične (nelegirane),
- niskolegirane,
- visokolegirane martenzitne,
- visokolegirane austenitne čelike.

Na slici 7 prikazan je orijentacijski prikaz ovisnosti statičke izdržljivosti o temperaturi za nelegirane, visokolegirane martenzitne i visokolegirane austenitne čelike za rad pri povišenim i visokim temperaturama. Vidljivo je da najbolje karakteristike na visokim temperaturama pokazuju visokolegirani austenitni čelici, dok ugljični (nelegirani) čelici posjeduju najslabije karakteristike.



Slika 7. Orijentacijski prikaz ovisnosti statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi za nelegirane, visokolegirane martenzitne i visokolegirane austenitne čelike [8]

3.1. Ugljični čelici

Glavni predstavnici ugljičnih (nelegiranih) čelika za rad pri povišenim temperaturama su čelici za kotlovski lim. Karakterizira ih zadovoljavajuća duktilnost, otpornost na starenje, dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama, umjerena postojanost prema vodi, vodenoj pari i lužinama te otpornost prema interkristalnoj koroziji. Također, takvi čelici su vrlo dobro zavarljivi. Nelegirani čelici prikladni su za trajni rad pri povišenim temperaturama (do oko 450 °C) jer su im pri visokim temperaturama trajna svojstva čvrstoće i granica razvlačenja vrlo niska. Čelici za kotlovski lim sadrže niski udio ugljika (<0,2%) te mangan (>0,4%), aluminij (>0,02%) i krom (<0,3%). Najčešće se isporučuju u obliku toplovaljanih limova ili ploča, a primjenjuju se za izradu oplata parnih kotlova, cijevi i spremnika većih promjera. Najčešće korišteni čelici za ovu grupu čelika su čelici P235GH i P265 GH, a njihova mehanička svojstva prikazana su u tablici 2 [1,7].

Tablica 2. Mehanička svojstva najčešće korištenih nelegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [3]

Oznaka	Mehanička svojstva							
	R _m N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ² , pri			R _{m/100000} , N/mm ² , pri			A ₅ , %, min.
		20 °C	200 °C	400 °C	400 °C	450 °C	500 °C	
P235GH	350...450	210	160	100	130	70	30	9810/R _m
P265GH	410...500	240	180	120	130	70	30	

3.2. Niskolegirani čelici

Pri dugotrajnom radu uz $\vartheta_r > 450$ °C u nelegiranim čelicima nastupaju problemi slabljenja zbog rekristalizacije matrice i koagulacije cementita (Fe₃C). Takve pojave se kod niskolegiranih čelika za rad pri visokim temperaturama reduciraju legiranjem karbidotvorcima (Mo, Cr, V) i legiranjem elementima koji povisuju temperaturu rekristalizacije (Mo). Molibden i krom stvaraju karbide Mo₂C i Cr₇C₃ koji usporavaju puzanje te povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Preporučeno temperaturno područje primjene niskolegiranih čelika je od 450 – 550 °C. Kod temperatura > 550 °C dolazi do koagulacije karbida, osiromašenja osnove s molibdenom te smanjenja temperature rekristalizacije. Kod ove grupe čelika sadržaj ugljika se

ograničava na manje od 0,25 % kako bi se postigla dobra zavarljivost. Imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu u normaliziranom stanju, a bainitnu u poboljšanom. Najčešće se izrađuju u obliku cijevi i limova, a primjenjuju se u termoenergetskim postrojenjima za izradu oplata kotlova, kotlovske cijevi, turbinske lopatice itd. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama su: 15Mo3, 13CrMo4-4, 10CrMo9-10, 22CrMo4-4, 24CrMoV5-5, a njihova mehanička svojstva prikazana su u tablici 3 [1,7].

Tablica 3. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama [3]

Oznaka	Mehanička svojstva								
	R _m N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ² , pri °C				R _{p1/10000} , N/mm ² , pri °C			
		20	200	400	500	450	500	530	580
15Mo3	500...650	260	255	177	147	216	147	85	-
13CrMo4-4	440...590	290	275	206	177	-	186	78	-
10CrMo9-10	440...590	260	245	206	186	-	157	83	47
22CrMo4-4	640...790	490	-	343	-	255	172	74	-
24CrMoV5-5	690...830	540	412	304	235	324	206	98	-

3.3. Visokolegirani martenzitni čelici

Visokolegirani martenzitni čelici sadržavaju oko 1% molibdena i do 12 % kroma tako da se nakon kaljenja postigne potpuno nova martenzitna struktura uz što manji udio δ-ferita. Osim dobre otpornosti na puzanje, visokolegirane martenzitne čelike karakterizira dobra vlačna čvrstoća i dobra dinamička izdržljivost. Martenzitni čelici svoju korozijsku postojanost, odnosno otpornost na oksidaciju na visokim temperaturama, postižu povećanim sadržajem kroma i silicija u odnosu na niskolegirane čelike. Elementi kao što su volfram, vanadij, niobij, kobalt zajedno s ugljikom tvore karbide koji pridonose povišenju otpornosti na puzanje otežanjem penjanja dislokacija i sklizanja ravnina. Udio kroma i molibdena otopljenih u martenzitu, utječe na povišenje rekristalizacijske temperature, a time i na usporenje puzanja. Ova skupina čelika prikladna je za dugotrajni rad do radnih temperatura 600 °C te upravo pokriva raspon od 500 – 600 °C, u kojem još nije ekonomična primjena skupih austenitnih

čelika. Ovi čelici se koriste za izradu raznih komponenata u termoenergetskim postrojenjima i kotlogradnji za izradu lopatica i rotora parnih i plinskih turbina, za izradu sabirnica i cijevi pregrijača pare i sl. Neki od visokolegiranih martenzitnih čelika za rad na visokim temperaturama su: X19CrMo12-1, X20CrMoV12-1, X20CrMoWV12-1, X19CrMoVNb11-1, a njihova mehanička svojstva prikazana su u tablici 4 [7,9].

Tablica 4. Često korišteni visokolegirani martenzitni čelici za rad pri visokim temperaturama [3]

Oznaka	Mehanička svojstva								
	R _m N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ² , pri °C					R _{p1/10000} , N/mm ² , pri °C		
		20	200	400	500	600	500	550	600
X19CrMo12-1	700...850	500	432	353	264	108	245	140	60
X20CrMoV12-1	700...850	500	432	353	264	108	245	145	77
X20CrMoWV1 2-1	800...950	600	530	423	344	206	260	160	60
X19CrMoVNb1 1-1	900...1050	780	700	580	470	315	360	200	120

3.4. Visokolegirani austenitni čelici

Osim već spomenutih utjecaja na povišenje rekristalizacijske temperature i povišenje otpornosti na puzanje (legiranje, karbidi, nitridi, grubo zrno i sl.), tip rešetke također ima veliki utjecaj pri radu na visokim temperaturama. Visokolegirani austenitni čelici imaju plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC) koja je „gušća“ te povoljnija od „rjeđe“ BCC rešetke koju imaju feritni čelici. Gušća zaposjednutost atomskih ravnina u sustavu FCC rešetke (4 atoma po rešetki, umjesto 2 atoma kao što je slučaj u BCC rešetci), osnovni je razlog većih međuatomnih sila pa ujedno i većeg otpora prema sklizanju ravnina na visokim temperaturama. Visokolegirani austenitni čelici pružaju najbolju kombinaciju korozijske postojanosti i vrlo dobrih mehaničkih svojstava na visokim temperaturama. Imaju dobru korozijsku postojanost zahvaljujući visokom sadržaju kroma, čiji je minimalni sadržaj 18 %. Rekristalizacijska temperatura austenitnih čelika je iznad 900 °C što čini austenitne čelike prikladnima za dugotrajni rad pri temperaturama 600 – 750 °C . Iako je tim čelicima granica razvlačenja pri 20 °C relativno niska, s povišenjem

temperature snižavanje te granice teče sporije nego kod svih drugih čelika pa već iznad 600 °C posebno legirani austenitni čelici poprimaju i bolje $R_{p0,2}=f(\theta)$ i bolja vremenska statička svojstva čvrstoće. Visokolegirani austenitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova parnih i plinskih turbina te mlaznih motora, cjevovoda, tlačnih posuda te također za izradu dijelova uređaja u kemijskoj i petrokemijskoj industriji. Neki od najčešće korištenih austenitnih čelika za rad pri temperaturama 600 – 800 °C su: X6CrNi18-11, X8CrNiMoNb16-16, X40CrNiCoNb13-13, X5NiCrTi26-15, a njihova mehanička svojstva prikazana su u tablici 5 [3,9].

Tablica 5. Najčešće korišteni visokolegirani austenitni čelici za rad pri visokim temperaturama 600 – 800 °C [3]

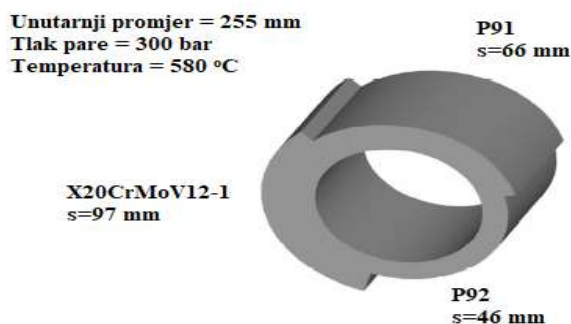
Oznaka	Mehanička svojstva									
	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ² , pri °C				$R_{p1/10000}$, N/mm ² , pri °C				
		20	400	600	700	550	650	700	750	800
X6CrNi18-11	490...690	185	98	78	69	180	80	49	34	-
X8CrNiMoNb16-16	530...690	215	147	132	-	324	226	137	83	54
X40CrNiCoNb13-13	640...830	345	245	196	-	-	186	127	78	49
X5NiCrTi26-15	930...1180	635	520	451	314	451	304	206	118	54

4. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA

U današnje se vrijeme s povećanjem svjetske populacije utječe na sve veću potrošnju električne energije što također zahtijeva i povećanje proizvodnje energije. Najveći dio električne energije proizvodi se izgaranjem fosilnih goriva pomoću energetskih kotlovskih postrojenja te u nuklearnim elektranama. Također, za proizvodnju električne energije sve se više koriste i razni obnovljivi izvori energije. Teži se što većoj iskoristivosti termoenergetskih postrojenja i smanjenju onečišćenja zraka i okoliša, zbog toga se projektiraju energetska postrojenja koja rade na visokim temperaturama i tlakovima. Komponente koje se koriste u kotlovskim postrojenjima u radu su podvrgnute raznim utjecajima kao što su visoki tlak, visoka radna temperatura, korozija i sl. Osnovna zahtijevana svojstva za rad na visokim temperaturama su dobra otpornost na puzanje, visoka korozijska otpornost u vodi i pari, dobra toplinska vodljivost, dobra zavarljivost i dr. Osnovne komponente kotlovskih postrojenja čine membranski zidovi, komore, bubanj, pregrijačke cjeline i sl. U izboru materijala za izradu komponenata koje su izložene visokom tlaku i visokoj radnoj temperaturi, visokolegirani martenzitni čelici kao što su čelici P91 zauzimaju sve veće mjesto [9].

4.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika P91

Čelik P91 pripada grupi 9 – 12 % Cr martenzitnih čelika. P91 je oznaka čelika prema američkom ASTM-u, dok se u Europi označava kao X10CrMoVNb9-1. Osnova za razvoj P91 čelika bio je čelik X20CrMoV12-1, a prve primjene čelika P91 bile su osamdesetih godina prošlog stoljeća. Primjenom suvremenih P91 čelika moguće je smanjenje debljine stijenke cijevi zbog boljih mehaničkih osobina na povišenim temperaturama u odnosu na konvencionalni martenzitni čelik X20CrMoV12-1 [10]. Slika 8 prikazuje primjer smanjenja debljine stijenke cijevi kod primjene različitih čelika.



Slika 8. Smanjenje debljine stijenke cijevi parovoda primjenom različitih čelika [10]

Iz slike 8 vidljivo je da se za istu radnu temperaturu i tlak, debljina stijenke cijevi može smanjiti do 30 % primjenom čelika P91 u odnosu na konvencionalni martenzitni čelik X20CrMoV12-1, a uz primjenu čelika P92 i do 50 %, što donosi značajne uštede materijala i značajno smanjuje masu konstrukcije. Prema europskoj oznaci, vidljivo je da su glavni legirajući elementi čelika P91 krom, molibden, vanadij i niobij. Tablica 6 prikazuje kemijski sastav, a tablica 7 prikazuje mehanička svojstva čelika P91.

Tablica 6. Kemijski sastav P91 čelika [11]

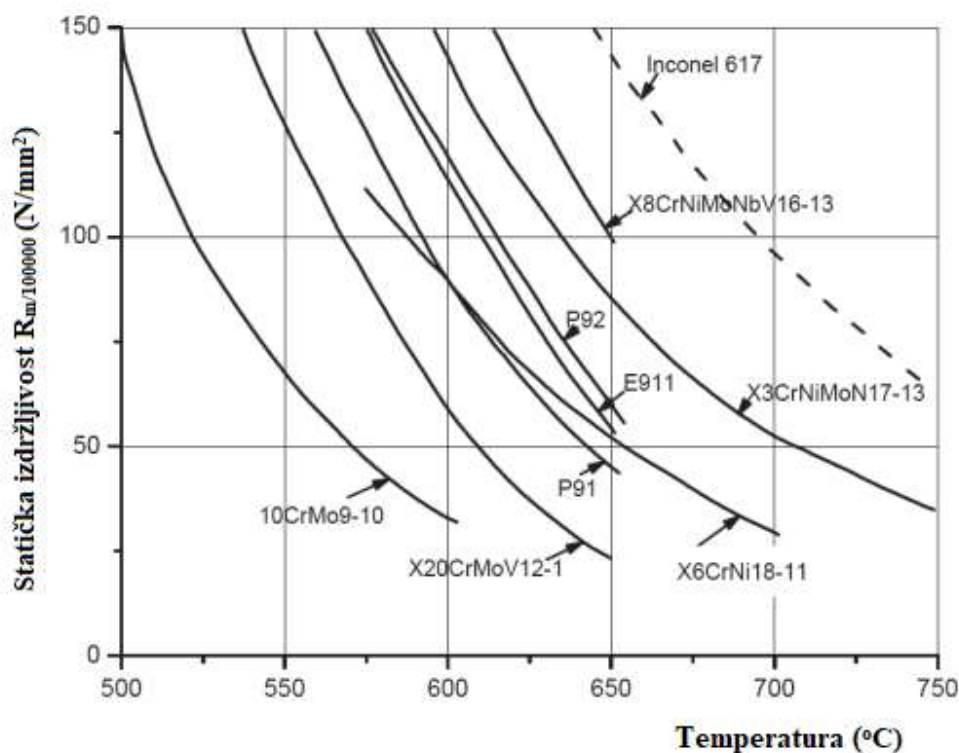
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	Nb	N
0,08-0,12	0,2-0,5	0,3-0,6	≤ 0,02	≤ 0,01	≤ 0,04	8-9,5	0,85-1,05	≤ 0,4	0,18-0,25	0,06-0,1	0,03-0,07

Iz tablice 6 vidljivo je da se osim glavnih legirajućih elemenata kao što su krom, molibden, vanadij i niobij, pojavljuju još i silicij, mangan, nikl te u vrlo malim količinama dušik, aluminij, fosfor i sumpor. *Ugljik* zapravo pripada čeliku pa se i ne smatra legirnim elementom. Za velik broj čelika on je najvažniji element i najjače utječe na svojstva čelika. *Krom* povišuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita. Krom je karbidotvorac i povišava trajnu toplinsku čvrstoću, otpornost na komprimirani vodik i vatrootpornost (otpornost na visokotemperaturnu koroziju – stvaranje ogorine). Učinak kroma posebno je istaknut na temperaturama iznad 500 °C. Tada ovaj element na površini metala formira tanki sloj kromovih oksida uslijed čega usporava unutarnju difuziju kisika i predstojeće reakcije. *Molibden* se najčešće legira zajedno s drugim legirajućim elementima. Znatno povećava prokaljivost čelika, a sprječava pojavu visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Povišuje trajnu čvrstoću pri povišenim temperaturama, a uz prisutnost kroma povećava i otpornost čelika na opću koroziju. Uz krom, jedan je od najvažnijih legirajućih elemenata kod čelika P91. *Vanadij* usitnjava primarno austenitno zrno kao jaki karbidotvorac i nitridotvorac. Najčešće se dodaje zajedno sa *niobijem* za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina. *Silicij* je jaki dezoksidator, povišuje čvrstoću i otpornost na trošenje, a posebno granicu razvlačenja. Također, silicij znatno povišuje vatrootpornost. *Mangan* je također dezoksidator i austenotvorac pa snižava temperature A_{c3} i A_{c1} u odnosu na ugljične čelike. Vrlo jako povećava prokaljivost čelika. *Nikl* povećava žilavost i snižava prijelaznu temperaturu žilavosti [3,8].

Tablica 7. Mehanička svojstva čelika P91 [11]

Oznaka	Mehanička svojstva								
	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ² , pri °C							
		20	100	200	300	400	500	550	600
P91	620...850	450	410	380	360	340	300	270	215

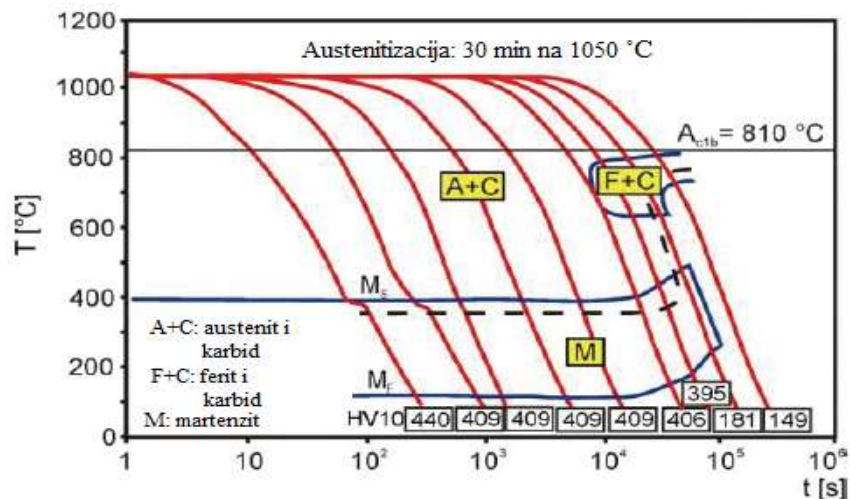
Na slici 9 prikazana je ovisnost statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi za čelik P91 i nekoliko drugih čelika koji se koriste u kotlogradnji. Vidljivo je da čelik P91 ima veću statičku izdržljivost od čelika X20CrMoV12-1 koji je služio kao osnova za razvoj čelika P91. Također, vidljivo je da visokolegirani austenitni čelici (npr. X3CrNiMoN17-13) kao i legure na bazi nikla (Inconel 617) imaju veću statičku izdržljivost na povišenim temperaturama, no zbog toga su i puno skuplji od martenzitnih čelika P91.



Slika 9. Ovisnost statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi za nekoliko vrsta čelika koji se koriste u kotlogradnji [11]

4.2. Mikrostruktura čelika P91

Ranije je navedeno da čelik P91 ima martenzitnu strukturu. Čelici P91 obično se poboljšavaju. Zagrijavanjem čelika P91 preko A_{c1} temperature dovodi do stvaranja austenita koji se uslijed hlađenja pretvara u martenzit. Transformacija počinje na temperaturi M_s , a završava na temperaturi M_f . Temperature M_s i M_f ovise najviše o sastavu čelika. Ugljik i većina drugih legiranih elemenata pomiču ih prema nižim vrijednostima. Kod čelika P91 temperatura M_s je otprilike na $400\text{ }^\circ\text{C}$, pa ne postoji opasnost da se potpuna transformacija austenita u martenzit neće odviti hlađenjem do sobne temperature. Osim martenzita pojavljuju se i karbidi $M_{23}C_6$ koji se talože po granicama zrna i služe za stabilizaciju lamelarne strukture martenzita [13]. Na slici 10 prikazan je dijagram kontinuiranog hlađenja (CCT) za čelik P91, a na slici 11 prikazana je mikrostruktura čelika P91.



Slika 10. CCT dijagram za čelik P91 [13]



Slika 11. Mikrostruktura čelika P91 (svjetlosni mikroskop - 1000x) [13]

5. ZAVARLJIVOST ČELIKA P91

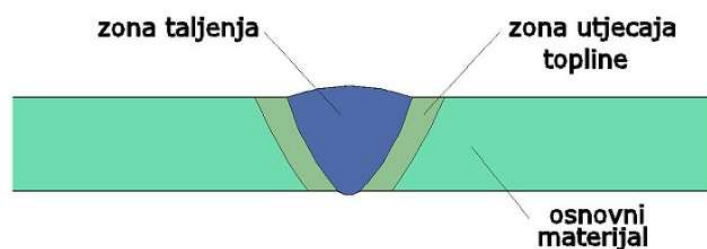
Svi martenzitni čelici spadaju u „teže“ zavarljive čelike, pa tako i čelik P91. Pojam „teže“ odnosi se na uvjete koje treba osigurati prije, za vrijeme i nakon zavarivanja. Kod zavarivanja čelika P91 posebna pažnja mora biti posvećena temperaturi predgrijavanja, postizanju i održavanju međuprolazne temperature i opasnostima koje mogu nastati s prekidima zagrijavanja. Također, naknadna toplinska obrada kao i izbor dodatnih materijala od vrlo je velike važnosti za postizanje zavarenih spojeva zadovoljavajućih mehaničkih svojstava.

5.1. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline

Prilikom zavarivanja dovedena toplina se širi od zone taljenja u osnovni materijal pa se oko zavara formira temperaturno polje. Prema tome, zavareni spoj se prema utjecaju topline može podijeliti na tri područja [14]:

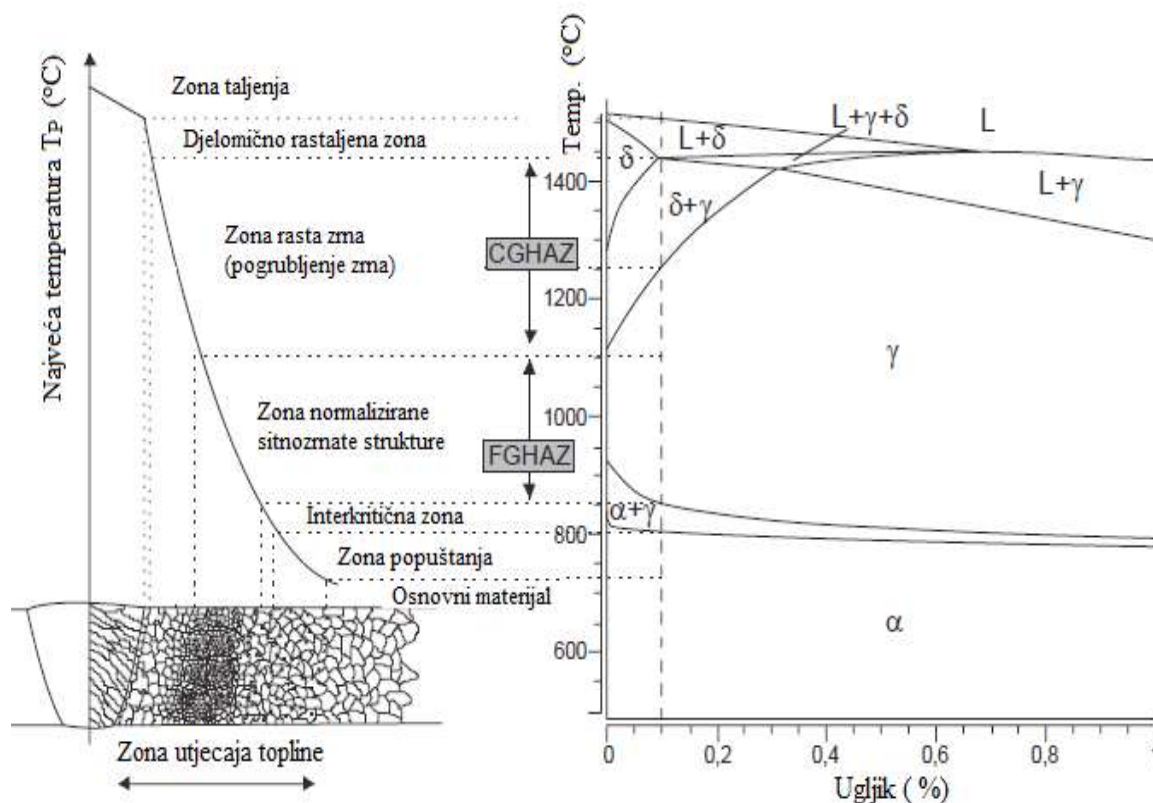
1. Zona taljenja,
2. Zona utjecaja topline,
3. Osnovni materijal.

Zona taljenja predstavlja dio spoja koji je bio u rastaljenom stanju te čijim je skrućivanjem došlo do formiranja spoja, dok zona utjecaja topline (ZUT) predstavlja područje osnovnog materijala u kojem nije došlo do taljenja osnovnog materijala tijekom zavarivanja, ali je došlo do promjene u strukturi, a time i do promjene mehaničkih svojstava. Osnovni materijal predstavlja dio spoja u kojem se nisu dogodile niti promjene u strukturi, a time ni promjene mehaničkih svojstava [14]. Na slici 12 prikazana su osnovna područja zavarenog spoja.



Slika 12. Osnovna područja zavarenog spoja [15]

U zoni utjecaja topline prilikom zavarivanja dolazi do promjene usmjerenosti i veličina zrna, što najviše utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja. Slika 13 prikazuje tipične promjene u strukturi kod zavarivanja visokolegiranog martenzitnog čelika P91.



Slika 13. Tipične promjene u strukturi zavarenog spoja čelika P91 [16]

Zona taljenja obuhvaća dio zavarenog spoja koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen (iznad likvidus linije). Pri ohlađivanju dolazi do kristalizacije pri čemu nastaje struktura različita od osnovnog materijala. Razlog tome je isparavanje određenih elemenata, reakcija s okolnim medijem te mikrolegiranje s elementima iz dodatnog materijala. Kristali najčešće rastu okomito na rubove zavarenog spoja, a dodiruju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati nastanak vrućih pukotina te također može biti koncentrador naprezanja pri opterećenju [14].

Djelomično rastaljena zona predstavlja dvofazno područje (talina i krutina), bogata je legirnim elementima i nečistoćama koje imaju nižu temperaturu taljenja, a sadrži i plinove. Ta zona se nalazi između likvidus i solidus linije te predstavlja vezu između osnovnog materijala i metala zavara. Lokalno povišen udio nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti s okolinom pa u strukturi često ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Također, kod tako visokih temperatura dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi i oksidi) s čime dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu što omogućuje pojavu toplih pukotina [14].

Zona rasta zrna (pogrubljenja zrna) nalazi se ispod solidus linije, a značajno iznad temperature A_{c3} (1100 – 1450 °C). Svi karbidi koji predstavljaju glavnu prepreku u rastu austenitnih zrna se otapaju, a kao posljedica nastaju krupna zrna austenita. Kod 9-12% Cr čelika pa isto tako i kod čelika P91, ovako dobiveni austenit se pri hlađenju pretvara u martenzit. Zona rasta zrna ima najveću tvrdoću, a istovremeno niske vrijednosti žilavosti [16].

Zona normalizirane sitnozrnate strukture nalazi se neznatno iznad temperature A_{c3} . Vršna temperatura nije dovoljno visoka da bi se potpuno otopili karbidi, čime se ograničava rast austenitnih zrna. Stvara se sitnozrnati austenit koji se kasnije pretvara u martenzit. Ova zona kao i interkritična zona smatra se najslabijom zonom u zavarenom spoju kad je spoj izložen radu na visokim temperaturama tj. ova zona ima najmanju otpornost na puzanje [16].

Interkritična zona (djelomična prekristalizacija) nalazi se u temperaturnom području između temperatura A_{c1} i A_{c3} . Kod ove zone kod zagrijavanja dolazi do djelomične pretvorbe ferita u austenit. Novi austenit nastaje na granicama prethodnih austenitnih zrna i na granicama lamela martenzita, dok je ostatak mikrostrukture popušten. Kod hlađenja austenit se pretvara u nepopušteni martenzit. Interkritična zona okarakterizirana je malom veličinom zrna što za posljedicu ima najniže vrijednosti tvrdoće [16].

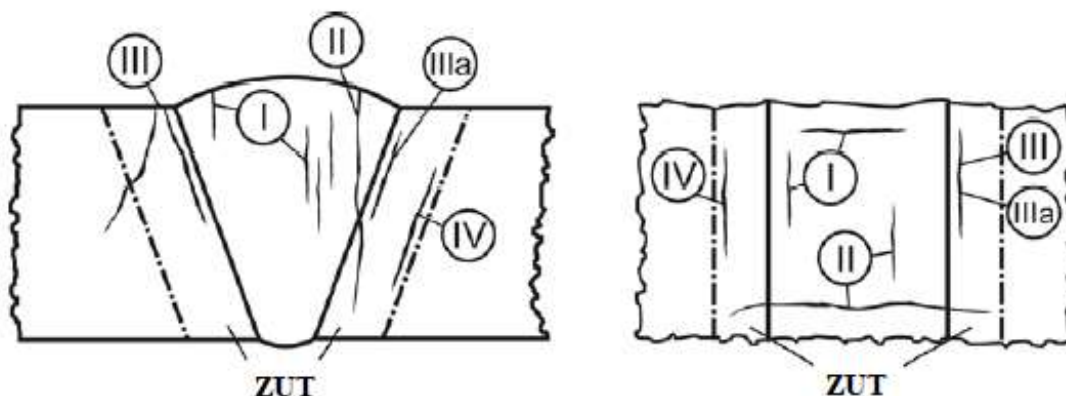
Zona popuštanja je u temperaturnom području ispod A_{c1} zbog čega je prvobitna mikrostruktura materijala izložena daljnjem popuštanju. Iako mikrostruktura ne prolazi nikakvu faznu transformaciju, moguće je da na visokim temperaturama bude lokalno zakaljena u odnosu na osnovni materijal [16].

Zona nepromijenjenog osnovnog materijala odnosi se na temperature do približno 700 °C. U toj zoni nema vidljivih promjena u mikrostrukturi materijala niti pomjena mehaničkih svojstava.

5.1.1. Pukotine kod zavarivanja čelika P91

Kod visokolegiranih martenzitnih čelika pa tako i kod čelika P91 postoji mogućnost nastanka pukotina. Da bi se vjerojatnost pojave pukotina svela na minimum potrebno je izvesti pravilnu toplinsku obradu, međutim, kod čelika P91 pukotine mogu nastati i poslije izvođenja pravilne toplinske obrade. Postoji četiri tipa pukotina koje se mogu pojaviti kod čelika P91, a klasificirane su prema njihovom položaju i orijentaciji unutar zavarenog spoja. Prema tome postoje pukotine I, II, III i IV tipa.

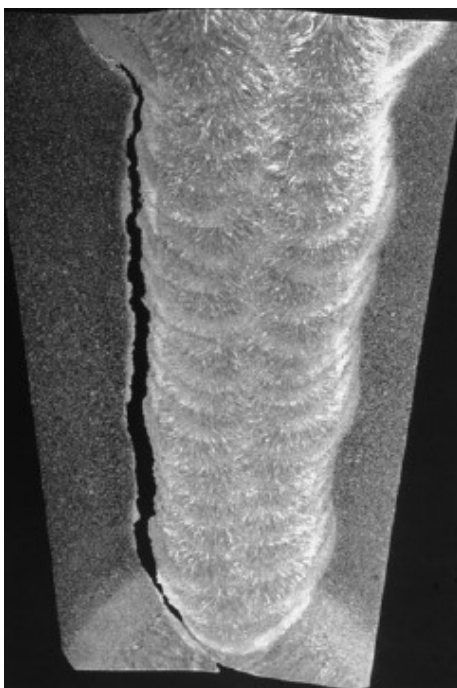
Pukotine nastale u metalu zavara pripadaju pukotinama I i II tipa. Dok pukotine I tipa nastaju samo u metalu zavara, II tip pukotina iz metala zavara može propagirati do zone utjecaja topline ili čak do osnovnog materijala. III i IV tip pukotina nastaje samo unutar zone utjecaja topline (ZUT), s time da se pukotine III tipa pojavljuju u zoni rasta zrna (gruboizrnatost zoni), a pukotine IV tipa javljaju se u zoni sitnozrnate strukture te u interkritičnoj zoni [16,17]. Na slici 14 dan je shematski prikaz moguće orijentacije i lokacije pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91.



Slika 14. Shematski prikaz moguće orijentacije i lokacije pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91 [16]

Čelik P91 kao i ostali martenzitni čelici povišene tvrdoće najosjetljiviji su na pojavu pukotina IV tipa. Pukotine IV tipa karakterizira povećana brzina formiranja šupljina uslijed puzanja u zoni sitnozrnate strukture i interkritičnoj zoni jer je u tim zonama najmanja vrijednost čvrstoće i najmanja otpornost na puzanje. Ova područja sadrže čestice krupnijih karbida koje dovode do smanjenja čvrstoće puzanja i nastanka šupljina. Kako je pojava pukotina IV tipa povezana sa heterogenošću mikrostrukture zone utjecaja topline, one se mogu ukloniti reustenitizacijom i toplinskom obradom popuštanjem. Međutim, to je teško ostvarivo i ne može se baš uvijek zaustaviti nastanak pukotina, zbog toga se pri projektiranju u obzir uzima smanjenje čvrstoće puzanja i odgovarajući smanjeni radni vijek konstrukcije. Vrijednost čvrstoće puzanja ovisi o kemijskom sastavu, toplinskoj obradi i drugim čimbenicima te se mora eksperimentalno odrediti pri svakoj primjeni što očigledno predstavlja ograničavajući faktor u postupku projektiranja. S razvojem brojnih tehnologija, danas je moguće razviti kvantitativni model fizičkih fenomena na osnovi postojećih eksperimentalno dobivenih podataka o karakteru i ponašanju materijala bez poznavanja unutrašnjih mehanizama. Pukotine IV tipa obično se pojavljuju nakon 40,000 do 80,000 sati eksploatacije [18].

Na slici 15 prikazana je pukotina IV tipa nastala nakon 200,000 sati rada na 540 °C i 18 MPa kod čelika P91.



Slika 15. Pukotina IV tipa nastala nakon 200,000 sati rada na 540°C i 18 MPa [16]

5.2. Toplinske obrade kod zavarivanja čelika P91

Toplinska obrada vrlo je bitna kod zavarivanja čelika P91. Njome se smanjuje mogućnost pojave pukotina, a isto tako vrlo je važna za mehanička svojstva zavarenih spojeva. Svi martenzitni čelici za izradu komponenti u kotlogradnji zahtijevaju predgrijavanje prije zavarivanja, kao i toplinsku obradu nakon zavarivanja. Prema tome, kod zavarivanja čelika P91 cijeli toplinski ciklus sastoji se od predgrijavanja, održavanja međuprolazne temperature te od naknadne toplinske obrade.

5.2.1. Predgrijavanje čelika P91

Općenito je kod zavarivanja cilj predgrijavanja snižavanje temperaturnih razlika između zagrijanog i nezagrijanog mjesta u području zavarivanja. S povišenjem temperature materijala smanjuje se brzina odvođenja topline te time i mogućnost otvrdnuća u zoni utjecaja topline kod pojedinih vrsta čelika [19]. Predgrijavati se može cijeli radni komad ili se može izvoditi lokalnim zagrijavanjem uske zone oko pripremljenog žlijeba. Također, predgrijavanjem se

smanjenje mogućnost pojave pukotina tijekom zavarivanja, no također provodi se i zbog sljedećih razloga [14]:

- smanjenje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukturi,
- lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja,
- smanjenje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju,
- postizanje željenih mehaničkih svojstava zavara koja ovise direktno o mikrostrukturi u zavaru i ZUT-u,
- pojedine vrste čelika predgrijavaju se na temperaturu iznad kritične temperature pri kojoj se pojavljuje krhki lom.

Budući da su čelici P91 martenzitni te kao takvi jako prokaljivi, kod sporog hlađenja će zona taljenja i zona utjecaja topline koje su bile austenitne prijeći u martenzit. Iako predgrijevanje smanjuje brzinu hlađenja, ona će još uvijek biti dovoljna da se zona taljenja i zona utjecaja topline potpuno transformiraju u martenzit i pri usporenom hlađenju jer su ove zone samozakaljive na zraku. Dakle kod čelika P91 predgrijevanje nema svrhu da se izbjegne martenzitna struktura nakon završenog zavarivanja, već da se smanji nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja pri stezanju. Viša temperatura predgrijevanja omogućuje izlazak difuzijskog vodika iz zavara te se smanjuje vjerojatnost pojave hladnih pukotina [20].

Da bi došlo do pojave hladnih pukotina moraju biti ispunjena tri uvjeta: struktura sklona zakaljivanju, prisutnost vodika i zaostala naprezanja. Kod čelika P91 prisutna su sva tri uvjeta i to je glavni razlog predgrijevanja ovih čelika. Čelici P91 predgrijavaju se na temperaturu od 200 °C, a to je minimalna temperatura predgrijevanja kod koje se može garantirati da se neće pojaviti hladne pukotine. Predgrijevanje se može izvoditi uz plinski postupak ili električni, što ovisi o dimenzijama i obliku predmeta koji je potrebno zavariti. Plinski postupak uglavnom se koristi kod predgrijevanja cijevi manjih dimenzija, dok se za predgrijevanje cijevi većih dimenzija primjenjuje električni postupak (induktivno ili elektrootporno)[21].

5.2.2. Održavanje međuprolazne temperature

Međuprolazna temperatura odnosi se na temperaturu materijala u blizini spoja neposredno nakon prvog prolaza te nakon svakog sljedećeg prolaza u slučaju višeslojnih zavara. Međuprolazna temperatura je jednako važna kao i temperatura predgrijavanja jer utječe na mikrostrukturu i na mehanička svojstva zavara. Na primjer granica tečenja i vlačna čvrstoća su funkcije međuprolazne temperature. Visoke međuprolazne temperature smanjuju čvrstoću metala zavara, a s druge strane smanjuju veličinu zrna i poboljšavaju zareznu žilavost. Ipak, ako međuprolazna temperatura poprimi previsoku vrijednost doći će do obrnutog efekta. [14].

Kod zavarivanja čelika P91, međuprolazna temperatura trebala bi biti 300 °C, no dopuštena je i nešto manja temperatura. Nakon zavarivanja potrebno je zavareni spoj lagano ohladiti ispod 80 – 100 °C za tanke materijale te na sobnu temperaturu za deblje materijale, kako bi se završila martenzitna pretvorba [13].

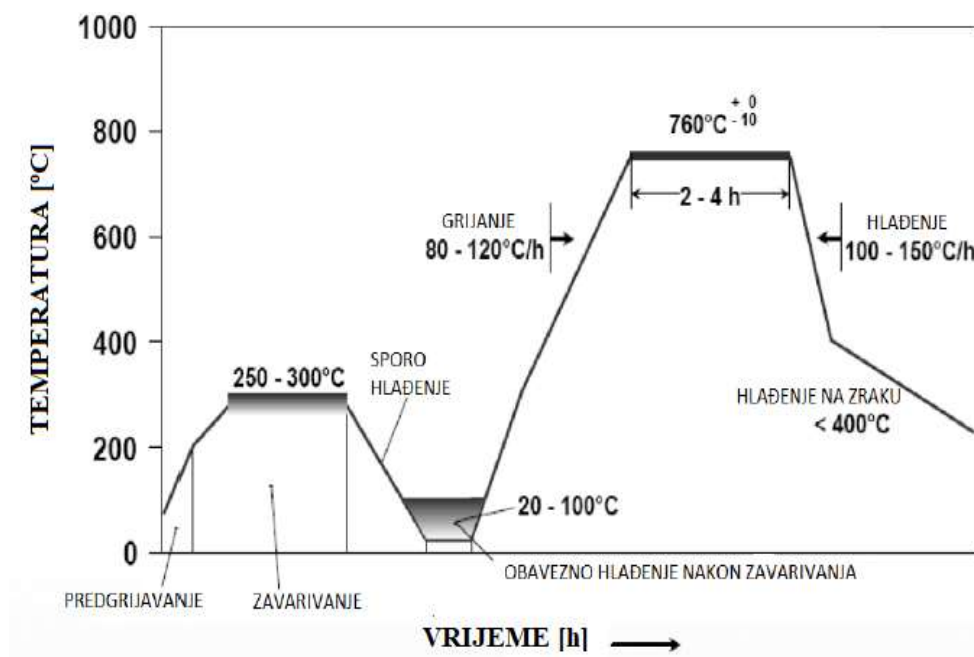
5.2.3. Naknadna toplinska obrada

Kod zavarivanja martenzitnih čelika P91, zona taljenja i dio zone utjecaja topline tijekom hlađenja do sobne temperature poprimaju krhku martenzitnu strukturu. Budući da je takva mikrostruktura znatno lošije duktilnosti i lomne žilavosti od okolne mikrostrukture koje su toplinskim obradama poboljšane, takvi čelici se odmah nakon zavarivanja ne mogu koristiti, već se mora obavezno provesti naknadna toplinska obrada kako bi zavareni spoj bio zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. Dakle, prije početka naknadne toplinske obrade vrlo je važno da se zavareni spoj ohladi ispod temperature martenzitne pretvorbe (80 – 100 °C) kako bi se prilikom toplinske obrade popustio sav martenzit u zavarenom spoju koji je nastao ohlađivanjem ispod M_f temperature.

Naknadna toplinska obrada martenzitnih čelika P91 izvodi se u cilju popuštanja, odnosno smanjenja zaostalih naprezanja u zavarenom spoju. Neophodna je bez obzira na debljine ili promjere te je jedan od najvažnijih čimbenika za kvalitetu zavarenog spoja. Naknadnom toplinskom obradom također se izbjegavaju hladne pukotine u zavarenom spoju koje bi propagirale u eksploataciji i izazvale havarije na kotlovskim postrojenjima. Kod martenzitnih čelika P91 naknadna toplinska obrada se provodi na temperaturama 750 – 770 °C u trajanju od 2 do 4 sata ovisno o debljini i obliku zavarenog spoja te o postupku zavarivanja. Temperatura toplinske obrade ne smije prijeći A_{c1} liniju jer bi došlo do nepovoljnih posljedica na otpornost

na puzanje. Temperatura toplinske obrade je u relativno uskom području tolerancija, a da bi se u tom području mogla provesti, potrebno je kalibrirati opremu za toplinsku obradu, termoparove te izvršiti provjeru izotermije peći. Vrlo je važno i imati osposobljene i iskusne operatere koji nadgledaju i vode proces toplinske obrade [13,21].

Na slici 16 prikazan je tipičan ciklus toplinske obrade čelika P91 koji uključuje temperaturu predgrijavanja, međuprolaznu temperaturu zavarivanja te potrebnu naknadnu toplinsku obradu nakon zavarivanja.



Slika 16. Tipičan ciklus toplinske obrade čelika P91 prije zavarivanja, za vrijeme i nakon zavarivanja [21]

5.3. Dodatni materijali za zavarivanje čelika P91

Kod zavarivanja visokolegiranih martenzitnih čelika P91 koriste se dva osnovna tipa dodatnog materijala [20]:

1. Dodatni materijal istog kemijskog sastava kao i osnovni materijal, tako da se dobije martenzitna struktura nakon zavarivanja,
2. Dodatni materijal austenitnog tipa (AISI 300) ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja, odabranog da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istežljivost zavara.

Korištenjem austenitnih dodatnih materijala smanjuje se količina difuzijskog vodika te je zbog toga smanjena vjerojatnost pojave hladnih pukotina. Zona taljenja zadržava visoku žilavost budući da se ne zakaljuje. Takvi dodatni materijali upotrebljavaju se kada se ne vrši naknadna toplinska obrada. Unatoč svemu zona utjecaja topline će se ipak zakaliti na zraku, a to može biti riješeno samopopuštanjem martenzitne strukture izlaganjem na visokoj radnoj temperaturi u eksploataciji. Ako se koristi dodatni materijal istog kemijskog sastava kao i čelik P91, zona taljenja se mora naknadno toplinski obrađivati. Također, zona taljenja imat će isti koeficijent toplinske istežljivosti kao i osnovni materijal, što je u nekim slučajevima povoljnije jer neće uzrokovati toplinska naprezanja pri zagrijavanju i hlađenju [20].

6. RAZNORODNI SPOJEVI ČELIKA P91

U postrojenjima procesne kemijske, energetske i nuklearne industrije postoje različiti uvjeti rada opreme koja je izložena bitno različitim razinama mehaničkih i toplinskih naprezanja kao i različitom korozijskom okolišu. Kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje dijelova izloženih takvim uvjetima rada, počela se razvijati uporaba različitih vrsta čelika koji se spajaju zavarivanjem. Najčešća kombinacija zavarivanja raznorodnih čelika je zavarivanje visokolegiranih čelika sa niskolegiranim ili nelegiranim čelicima. Od visokolegiranih čelika se izrađuju dijelovi konstrukcija koje će biti izložene visokim temperaturama, agresivnim medijima i sl., budući da su takvi čelici postojani u takvim uvjetima rada. Ostatak konstrukcije se najčešće izrađuje od puno jeftinijih niskolegiranih ili nelegiranih čelika koji zadovoljavaju uvjete eksploatacije. Osim zavarivanja prisutno je i navarivanje, oblaganje – platiranje gdje je osnovna ideja osigurati mehaničku otpornost s pomoću jeftinijeg nelegiranog ili niskolegiranih čelika, a površinu tog nosivog dijela konstrukcije protiv kemijskog djelovanja nerazdvojivo obložiti tj. platirati metalnim korozijski postojanim materijalom. Danas se iz raznovrsnih i platiranih materijala izrađuju reaktori i izmjenjivači topline u kemijskoj industriji, generatori pare i reaktori u energetici i atomskoj tehnici, tlačni spremnici za skladištenje agresivnih kemikalija kao i cjevovodi većih promjera i debljina stjenke [22].

6.1. Problematika zavarivanja raznorodnih čelika

Tehnologija zavarivanja raznorodnih čelika je mnogo složenija od zavarivanja čelika iste strukturne klase. Složenost zavarivanja raznorodnih čelika rezultat je različitih strukturnih, mehaničkih i fizikalno-kemijskih svojstava, što se iskazuje kemijskom i strukturnom raznorodnošću unutar zavarenog spoja. Uvjeti eksploatacije, izbor sastava dodatnog materijala, parametri zavarivanja i miješanje osnovnog i dodatnog materijala su važne veličine za kvalitetu raznorodno zavarenog spoja [22].

Kod zavarivanja raznorodnih čelika uvijek se mora obratiti pozornost na sljedeće faktore [24]:

1. Odabir dodatnog materijala se vrši prema svojstvima osnovnog materijala. Za nelegirane, niskolegirane i srednje legirane čelike bira se bolje zavarljivi (niže legirani). Za spoj visokolegiranih s nekim drugim manje legiranim ili nelegiranim čelikom treba koristiti visokolegirani dodatni materijal jer će miješanjem doći do krhke martenzitne zone taljenja.

2. Predgrijavanje i međuprolazna temperatura moraju odgovarati zahtjevima ZUT M1, ZUT M2 i ZT. Možda će biti potrebno zahtijevati različite temperature za M1 i M2 materijale odnosno za strane spoja.
3. Režim zavarivanja i unos topline se moraju kompromisno odabrati.
4. Toplinska obrada se mora kompromisno odabrati.

Jedan od osnovnih čimbenika koje treba ocijeniti pri izboru dodatnog materijala za zavarivanje odnosno postupka zavarivanja je stupanj protaljivanja (miješanja). Stupanj protaljivanja (γ) određuje se kao udio osnovnog metala u sastavu zavara:

$$\gamma = \frac{n}{(n+m)}, \% \quad (2)$$

gdje je:

n – udio protaljenog osnovnog metala u zavaru,

m – udio nataljenog metala u zavaru.

Kod zavarivanja raznorodnih čelika stupanj protaljivanja (penetracije, miješanja) treba biti što manji pri čemu bi se suzila prijelazna zona te smanjila kemijska raznorodnost [22]. Difuzijski procesi predstavljaju jedan od glavnih problema pri zavarivanju. Ugljik je element koji je najviše sklon difuziji zbog njegovih malih atoma, a osim njega povećanu pokretljivost pokazuju i ostali karbidotvorci (Cr, Mo, V). Zavareni spojevi različitih oblika mogu biti skloni migraciji ugljika ako je spoj izložen visokim temperaturama u eksploataciji ili kod naknadne toplinske obrade. Da bi ugljik migrirao, mora postojati razlika u sadržaju elemenata tvoraca karbida: Cr, Mo, V, Nb i drugih. Tako će npr., kada je zavareni spoj izložen dovoljno dugo na visokim temperaturama, ugljik migrirati iz materijala s nižim sadržajem kroma u materijal s višim sadržajem Cr. Također, ako je razlika u sadržaju Cr, Mo, Nb i drugih karbidotvoraca dovoljno visoka, ugljik će čak prelaziti iz materijala s nižim sadržajem ugljika u materijal s višim sadržajem ugljika. Tako će npr. kod zavarivanja martenzitnih čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika, zbog višeg udjela kroma i ostalih karbidotvoraca u austenitnom čeliku, ugljik migrirati od martenzitnog čelika P91 prema visokolegiranom austenitnom čeliku. U zoni osiromašenoj ugljikom čvrstoća će biti manja, a u zoni obogaćenoj ugljikom će doći do stvaranja karbida, povećanja čvrstoće i smanjenja istežljivosti [24].

Još jedan od problema kod zavarivanja raznorodnih čelika su toplinska naprezanja. Na nastajanje naprezanja utječu i mehanička i fizikalna svojstva čelika koji se zavaruje, a to su:

koeficijent linearnog istezanja, toplinska vodljivost, modul elastičnosti itd. U tablici 8 prikazana su svojstva različitih vrsta čelika.

Tablica 8. Svojstva različitih vrsta čelika [22]

SVOJSTVO	Austenitni Cr – Ni čelici	Feritni Cr čelici	Martenzitni Cr čelici	Ugljični čelici
Gustoća ρ (kg m⁻³)	7800-8000	7800	7800	7800
Koeficijent linearnog istezanja (0-500 °C), α (10⁻⁶ K⁻¹)	17-19,2	11,2-12,1	11,6-12,1	11,7
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), λ (W m⁻¹ K⁻¹)	18,7-22,8	24,2-26,3	28,7	60
Specifični električni otpor (10⁻⁶ Ω m)	69-102	59-67	55-72	12
Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C), c (J kg⁻¹ K⁻¹)	460-500	460-500	420-460	480
Vlačni modul elastičnosti E (GPa)	190-200	200	200	210
Područje taljenja (°C)	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1538

Zbog višekratnih temperaturnih promjena i razlika u koeficijentima linearnog istezanja na mjestu spoja raznorodnih čelika, dolazi do naprezanja koja mogu dovesti do pojave pukotina, obično na strani čelika sa manjim koeficijentom linearnog istezanja. Usporedbom koeficijenata linearnog istezanja čelika različite strukturne vrste, najveća razlika od 35 % uočena je između čelika austenitne i feritno-perlitne strukture. Što je veća razlika u koeficijentima linearnog istezanja materijala koji se zavaruje bit će i veći stupanj nastalih napetosti. Na napetosti raznorodno zavarenog spoja može utjecati i znatna razlika u vrijednostima modula elastičnosti osnovnog materijala i metala zavara [22,24].

Čvrstoća zavarenih spojeva od raznorodnih čelika može se osigurati samo ako u području spoja nema krhkih međuslojeva. Prema tome, kod izbora dodatnog materijala i određivanja stupnja protaljivanja osnovnog materijala neophodno je ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih zona spoja. Kako bi se predvidjela mikrostruktura, Schaeffler je razvio strukturni dijagram koji je kasnije dopunio DeLong i M.C.T. Bystram. (Cr) ekvivalentom izražen je

utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (α -geni elementi), a (Ni) ekvivalentom utjecaj elemenata koji podupiru stvaranje austenita (γ -geni elementi). Schaeffler-ov dijagram na apscisi sadrži ekvivalente kroma, a na ordinati ekvivalente nikla. Struktura depozita određuje se na temelju kemijskog sastava koji se izražava pomoću spomenutih ekvivalenata kroma i nikla, a sastav strukture depozita se određuje u područjima [25]:

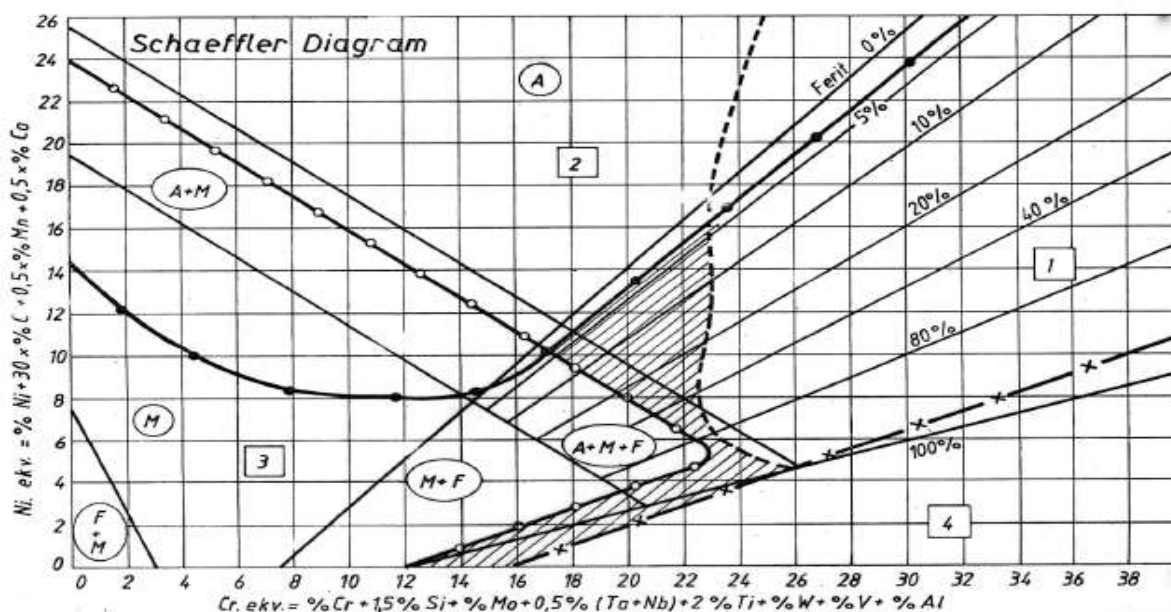
- austenita (A)
- martenzita (M)
- ferita (F)
- kombinacije (A+F, A+M, A+M+F, F+M).

Ekvivalenti za nikel i krom se izračunavaju prema formulama [25]:

$$Ni_{ekv} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn + 0,5 \times \%Co \quad (3)$$

$$Cr_{ekv} = \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo + 0,5 \times \% (Ta + Nb) + 2 \times \%Ti + \%W + \%V + \%Al \quad (4)$$

De Long je modificirao ekvivalent Ni time što je u formulu unio utjecaj dušika i mjereći sadržaj delta ferita feritnim brojem FN, a vrlo je značajna i M. C. T. Bystram-ova dopuna Schaeffler-ovog dijagrama s četiri linije koje označavaju četiri polja. Osnovna strukturna područja u Schaeffler-ovom strukturnom dijagramu su razgraničena pravcima i označena početnim slovima naziva strukture koja nastaje [22]. Na slici 17, prikazan je Schaeffler-ov dijagram (dopunjen od strane DeLong-a i M.C.T. Bystram-a) s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti.



Slika 17. Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLong-om i M.C.T. Bystram-om [22]

Bystram-ova dopuna obuhvaća 4 linije koje označavaju 4 sljedeća područja [25]:

1. Područje – kod tog područja na temperaturama od 500 – 900 °C dolazi do pojave krhke σ -faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno – feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10 % δ -ferita (α -faze).
2. Područje – materijali koji se prema Cr i Ni ekvivalentima nalaze iznad 1250 °C u području 2 skloni su stvaranju toplih pukotina. Sa slike je vidljivo da ovo područje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom strukturom, stoga ukoliko se zavarivaju s čisto austenitnim dodatnim materijalom moguća je pojava toplih pukotina te je rješenje u zavarivanju ovih čelika s dodatnim materijalom koji u strukturi metala zavora osigurava 3 – 10 % ferita.
3. Područje – tu se nalaze zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom te su oni izrazito skloni pojavi hladnih pukotina (na temperaturama ispod 400 °C). Moguće rješenje je u predgrijavanju i naknadnoj toplinskoj obradi žarenjem.
4. Područje – obuhvaća korozijski postojeće čelike s vrlo malim sadržajem ugljika, a pri temperaturama iznad 1100 °C izrazit je rast zrna što rezultira sklonošću pojavi pukotina u zavaru i zoni utjecaja topline (ZUT).

Šrafirani dio u dijagramu predstavlja područje optimalnog sastava zavarenog spoja. Zato je potrebno voditi računa da se zavar nalazi u tom području. U praksi nije uvijek moguće pa se poduzimanjem drugih mjera može doći do kvalitetnih zavora.

6.2. Izbor postupka zavarivanja

Za zavarivanje raznorodnih čelika postupak zavarivanja nije toliko presudan, već je bitnije odabrati ispravnu tehnologiju zavarivanja koja omogućuje minimalno protaljivanje – miješanje (penetraciju) rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim materijalom na strani raznorodnog spoja. To je potrebno ostvariti kako bi se spriječilo nastajanje krhkih struktura te kasnije nastanak pukotina u prijelaznom sloju posebno ako je riječ o zavarivanju austenitnog korozijski postojećeg čelika s ugljičnim feritno – perlitnim čelikom [25]. U tablici 9 prikazani su stupnjevi miješanja za neke postupke zavarivanja taljenjem.

Tablica 9. Stupnjevi miješanja za neke postupke zavarivanja taljenjem [25]

Postupak	Stupanj miješanja (dilucije), d
EPP zavarivanje trakom / TIG toplom žicom	8 – 20 %
TIG	15 – 100 %
REL s rutilnom elektrodom	15 – 25 %
REL s bazičnom elektrodom	20 – 30 %
MAG	20 – 40 %
MAG impulsno	10 – 30 %
EPP zavarivanje žicom	30 – 50 %

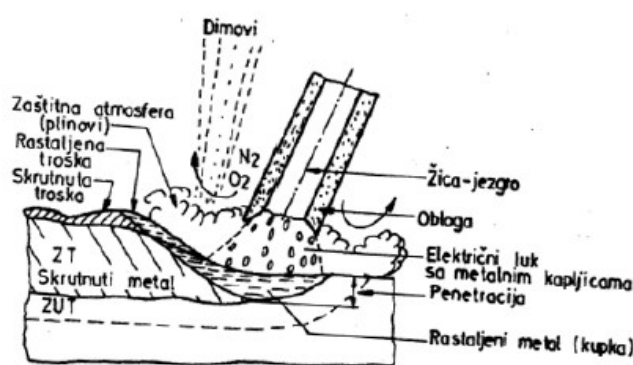
Općenito u primjenjive postupke zavarivanja za spajanje čelika različitih strukturnih vrsta ubrajaju se [25]:

- Postupci zavarivanja taljenjem (REL, MIG/MAG, EPP, TIG...),
- Postupci zavarivanja taljenjem s vrlo niskim razrjeđenjem odnosno miješanjem metala zvara, kao što su zavarivanje pulsirajućim lukom, zavarivanje elektronskim mlazom, lasersko zavarivanje,
- Postupci spajanja bez taljenja (zavarivanje trenjem, zavarivanje eksplozijom, tvrdo lemljenje...).

Kod zavarivanja čelika P91 sa niskolegiranim ili visokolegiranim austenitnim čelicima, ovisno o dimenzijama konstrukcije (promjer cijevi, debljina ploče itd.) prvenstveno se koriste postupci zavarivanja REL, TIG, MIG/MAG. Potrebno je samo odabrati pravilan dodatni materijal. EPP postupak je manje primjenjiv jer nije prilagodljiv svim uvjetima i položajima zavarivanja.

6.2.1. REL postupak zavarivanja

Ručni elektro-lučni postupak zavarivanja (REL) sa obloženom elektrodom pripada postupcima zavarivanja taljenjem. Dodatni materijal u obliku obložene elektrode zajedno s osnovnim materijalom, tali se toplinskom energijom dobivenom od električnog luka. Na slici 18 dan je shematski i realni prikaz REL zavarivanja.



Slika 18. REL zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [19,27]

Električni luk se uspostavlja kratkim spojem između elektrode, koja je ujedno i dodatni materijal, i radnog komada. Kod ovog postupka električna energija se dobiva iz izvora koji može biti transformator, ispravljač ili u novije vrijeme sve više korišteni invertori. Taljenjem dodatnog materijala dolazi do stvaranja odgovarajuće količine rastaljenog materijala, troske i plinova. Tekuća troska prekriva metalnu kap za vrijeme prolaza kapi kroz električni luk, a dodatnu zaštitu metalne kapi tvore plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge. Taljenje obloge odvija se s unutarnje strane prema vanjskoj tako da na vrhu elektrode nastaje krater koji usmjerava struju plinova i kapi rastaljenog metala i troske prema rastaljenom osnovnom materijalu. Hlađenjem rastaljenog metala dolazi do njegovog skrućivanja, a sloj troske koji ga prekriva regulira njegovu brzinu ohlađivanja. Ravnomjernim dodavanjem elektrode u električni luk i njenim poprečnim gibanjem na mjestu zavarivanja nastaje zavareni spoj [26].

Prednosti REL postupka zavarivanja su [26]:

- velik izbor dodatnih materijala,
- niska cijena opreme u odnosu na druge postupke (MAG, EPP...),
- pogodan za manja reparaturna i proizvodna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- pogodan za zavarivanje na terenu,
- jednostavno rukovanje opremom,
- dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva.

Nedostaci REL postupka zavarivanja su [26]:

- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EPP,

- kvaliteta zavarenog spoja značajno ovisi o vještinama zavarivača,
- vrijeme izobrazbe zavarivača je relativno dugo,
- neizbježan otpad elektroda,
- gubitak materijala zbog prskanja te gubitak vremena zbog čišćenja troske,
- dugotrajan rad ostavlja štetne posljedice na zdravlje zavarivača.

Osnovni parametri kod zavarivanja REL postupkom su jakost, polaritet i vrsta struje, brzina zavarivanja te nagib elektrode i dužina električnog luka.

Jakost struje ovisi o vrsti i debljini elektrode, obliku spoja, debljini osnovnog materijala i položaju zavarivanja. Kod REL postupka zavarivanja jakost struje najčešće se određuje prema formuli $30 - 40 A \times d$, gdje d predstavlja promjer elektrode u mm. Kod prisilnih položaja zavarivanja uzima se vrijednost obično 10 % - 20 % manja od izračunate. Pri zavarivanju visokolegiranih čelika potrebna je manja jakost struje zbog visokog omskog otpora tih čelika. Iz tog razloga se elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika lakše pregrijavaju nego elektrode za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika.

Vrsta struje ovisi o tipu obloge elektrode. Bazične elektrode se najčešće upotrebljavaju sa istosmjernom strujom te “ + “ polom na elektrodi, dok ostali tipovi elektroda kao što su rutilna, kisela, celulozna i sl. mogu biti spojeni na izmjeničnu ili istosmjernu struju.

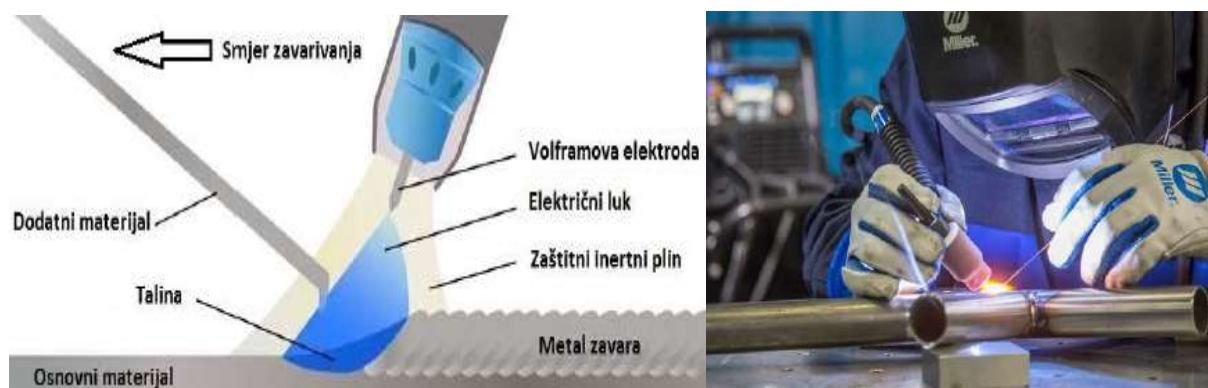
Dužina električnog luka predstavlja udaljenost elektrode od osnovnog materijala, a ovisi o vrsti elektrode. Kod rutilnih i kiselih elektroda dužina električnog luka približno je jednaka promjeru elektrode, dok je kod bazičnih elektroda te elektroda za zavarivanje visokolegiranih čelika i obojenih metala dužina približno pola promjera elektrode.

Brzina zavarivanja ovisi o tehnici rada, vrsti osnovnog materijala, pripremi spoja i vrsti elektrode. Veća ili manja brzina zavarivanja bitno utječe na kvalitetu spoja. Pri zavarivanju rutilnim i mineralno kiselim elektrodama brzine zavarivanja su veće nego pri zavarivanju bazičnim elektrodama. Kod sitnozrnatih, niskolegiranih i visokolegiranih (CrNi) elektroda potrebne su veće brzine zavarivanja radi manjeg unosa topline [19].

6.2.2. TIG postupak zavarivanja

Kod TIG postupka zavarivanja, električni luk se kao izvor topline za zavarivanje uspostavlja u inertoj atmosferi (Ar ili He) između radnog komada i netaljive volframove elektrode. Zavarivati se može sa ili bez dodatnog materijala, a ukoliko se zavaruje sa dodatnim

materijalom, žica (dodatni materijal) dodaje se u električni luk ručno (češće) ili mehanizirano (rjeđe). Na slici 19 dan je shematski i realni prikaz TIG postupka zavarivanja.



Slika 19. TIG zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [28]

TIG postupkom mogu se zavarivati svi metali. Najviše se primjenjuje za zavarivanje aluminija i Al-legura, magnezija i Mg-legura, bakra i Cu-legura, visokolegiranih (Cr, CrNi, CrNiMo) i drugih čelika. Zaštitni plin je skup pa se TIG postupak u pravilu ne koristi za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, međutim ponekad se koristi i kod takvih čelika, npr. kod zavarivanja korijena zavara na cijevima [19].

Osnovne prednosti TIG postupka zavarivanja su [19]:

- koncentriranost električnog luka,
- nema prskanja i troske,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje širokog spektra metala i legura,
- mogućnost zavarivanja raznorodnih metala,
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja materijala malih debljina,
- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom,
- odličan izgled zavarenog spoja.

Nedostaci TIG postupka zavarivanja su [19]:

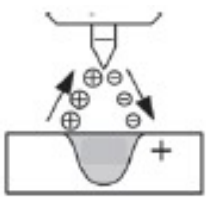
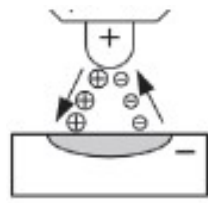
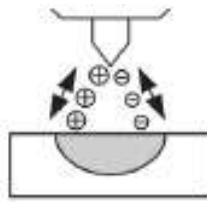
- vrlo mala brzina zavarivanja,
- mali depozit dodatnog materijala,

- neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm),
- zahtijeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- duža izobrazba zavarivača,
- otežanost izvođenja na otvorenim prostorima,
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod zavarivanja u skućenim prostorima.

Glavni parametri koji utječu na TIG zavarivanje su struja zavarivanja, brzina zavarivanja, vrsta i promjer netaljive elektrode te vrsta i protok zaštitnog plina. Mehanička svojstva i izgled zavara ovise o navedenim parametrima, stoga je potrebno odrediti optimalne parametre kako bi zavar bio kvalitetan.

Struja zavarivanja je najvažniji parametar jer utječe na oblik metala zavara, unos topline, zonu utjecaja topline te na penetraciju i depozit. Veća struja znači i veću penetraciju. Jačinu struje potrebno je odrediti u ovisnosti o vrsti i promjeru netaljive elektrode, vrsti struje (AC, DC), debljini osnovnog materijala, položaju zavarivanja i dr. Kod TIG postupka zavarivanja može se zavarivati s izmjeničnom (AC) strujom te istosmjernom (DC) strujom s elektrodom na plus (+) ili minus (-) polu. Tablica 10 prikazuje karakteristike TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu.

Tablica 10. Karakteristike TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [29]

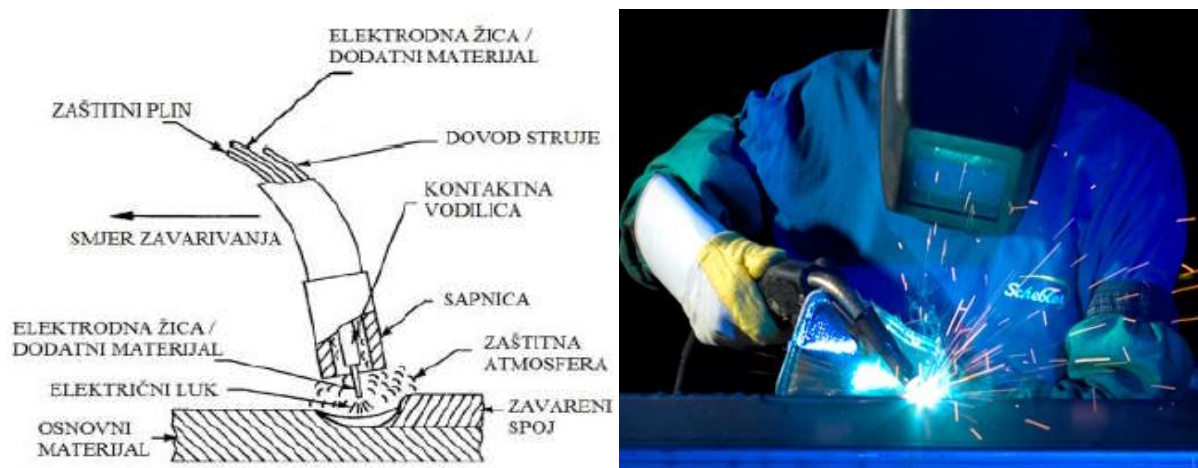
Vrsta struje i polaritet	DC (-)	DC (+)	AC
Shematski prikaz			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka, srednje duboka
Zavarivani materijali	svi osim Al, Mg i njihovih legura	posebni slučajevi	Al i Mg i njihove legure

Brzina zavarivanja kao i kod REL-a ovisi o tehnici rada, vrsti osnovnog materijala te o pripremi spoja. Brzina zavarivanja zajedno sa strujom određuje unos topline u radni komad. Promjena brzine zavarivanja ima utjecaja na oblik zavara i dubinu penetracije. Kod ručnog zavarivanja zavarivač određuje i postiže određenu brzinu zavarivanja, dok se kod mehaniziranog zavarivanja brzina postiže pomoću opreme. Uz konstantni napon i struju zavarivanja, povećanje brzine zavarivanja uzrokovat će smanjenje depozita i dubinu penetracije.

Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu koja se daje što lakše ionizirati te štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu svrhu koriste se inertni plinovi, najčešće argon (Ar), helij (He) te njihove mješavine. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, u odnosu na helij, ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Helij ima deset puta manju masu od argona pa zbog toga protoci helija moraju biti i do tri puta veći nego kod argona. Dobra strana helija je što daje širi električni luk i ima dobru toplinsku vodljivost. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i veći unos topline. Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihovih mješavina u različitim omjerima, a isto tako postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine, npr. vodik koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost povećava penetraciju, a mješavine s dodatkom dušika uglavnom se upotrebljavaju za zavarivanje materijala sa austenitnom strukturom [29].

6.2.3. MIG/MAG postupak zavarivanja

MIG/MAG (eng. *Metal Inert/Active Gas*) je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog (Ar, He i mješavine) ili aktivnog plina (CO₂ i mješavine). Uloga zaštitnog plina je da štiti rastaljeni metal i električni luk od negativnog utjecaja okoline te da ionizira vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk se stvara između vrha žice (uobičajeno spojena na „+“ pol istosmjernog izvora) i radnog komada. Žica ima ulogu elektrode i dodatnog materijala, a kontinuirano se dodaje preko dodavača žice i pištolja u rastaljenu zonu. Taljenjem žice popunjava se unaprijed pripremljen prostor. Postupak MIG/MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili potpuno automatiziran/robotiziran [30]. Na slici 20 dan je shematski i realni prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 20. MIG/MAG zavarivanje; lijevo-shematski prikaz, desno-realni prikaz [30,31]

Kao i svaki postupak zavarivanja, tako i MIG/MAG postupak zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke. Ovaj postupak ima široku primjenu zahvaljujući sljedećim prednostima [30]:

- postupak je primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- zavarivanje se može izvoditi u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala,
- širok raspon debljina materijala koji se zavaruje,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju itd.

Nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja su [30]:

- mogući problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij),
- veći broj grešaka kod neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom)
- složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija),
- zbog oblika pištolja za zavarivanje, postoje određene poteškoće pri zavarivanju teško dostupnih spojeva,
- kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin).

Da bi zavareni spojevi bili kvalitetno izvedeni, potrebno je pravilno odabrati parametre zavarivanja. Najvažniji parametri kod MIG/MAG zavarivanja su jakost struje, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice, napon te protok i vrsta zaštitnog plina.

Jakost struje jedan je od najvažnijih parametara. O jakosti struje ovisi način prijenosa metala, stabilnost električnog luka, penetracija i depozit rastaljenog metala. Iznos struje određuje se ovisno o promjeru žice, debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, o tehnici rada te o željenom načinu prijenosa metala. Iznos može biti od nekoliko desetaka A pa do nekoliko stotina A.

Brzina zavarivanja je parametar o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja te ga zbog toga treba pažljivo i pravilno odabrati. Odabir brzine vrši se u korelaciji s položajem i strujom zavarivanja. Promjena brzine zavarivanja utječe na izgled profila zavara. S povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži i penetracija manja, dok sa smanjenjem brzine zavar postaje širi i penetracija bolja.

Slobodni kraj žice je dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka. Drugim riječima, to je dio žice koji je vidljiv zavarivaču. Promjena slobodnog kraja žice utječe na jakost struje u električnom luku. S povećanjem slobodnog kraja žice dolazi do povećanja otpora struji te pada jakosti struje, dok se smanjenjem slobodnog kraja žice dovodi do pada otpora protoku struje i do porasta jakosti struje. Da bi se održala konstantna vrijednost penetracije i da bi zavar bio kvalitetan, potrebno je duljinu slobodnog kraja žice održavati konstantnom.

Napon je uz jakost struje najvažniji parametar MIG/MAG zavarivanja. Stabilnost električnog luka te njegova širina i duljina direktno ovise o naponu. Za dulji električni luk potreban je veći napon što daje širi zavar uz manju penetraciju. Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala. Današnji uređaji za MIG/MAG zavarivanje su sinergijski izvori struje za zavarivanje koji prema definiranoj krivulji odabiru optimalnu kombinaciju napona i jakosti struje.

Već je rečeno kod TIG postupka zavarivanja, da je uloga *zaštitnog plina* da zaštiti zavareni spoj od negativnog utjecaja okolne atmosfere. Osim toga zaštitni plin ima velik utjecaj na oblik profila zavara (širina i penetracija), brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Protok zaštitnog plina namješta se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete zavarivanja i karakteristike spoja koji je potrebno zavariti. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina [30].

6.3. Dodatni materijali

Kvaliteta i svojstva zavarenog spoja u velikoj mjeri ovise o izboru dodatnog materijala, a naročito ako je riječ o raznorodno zavarenom spoju. Svojstva osnovnih materijala u spoju raznorodnih čelika se znatno razlikuju što otežava izbor dodatnog materijala. Ovisno o vrsti čelika koji se zavaruje, kao i uvjeta rada, dodatni materijal može po svom sastavu biti blizak niže odnosno više legiranom osnovnom materijalu ili se može razlikovati od oba materijala. Najvažnije je osigurati dovoljnu čvrstoću zavara koja ne bi smjela biti niža od čvrstoće niže legiranog čelika. Također, pravilan izbor dodatnog materijala treba osigurati minimalno ili potpuno isključenje pojave difuzijskih slojeva krhkih struktura te pojave mogućih pukotina. Kod zavarivanja feritno-perlitnog čelika s austenitnim nehrđajućim čelikom preporuča se primjena austenitnog dodatnog materijala budući da se primjenom tog tipa dodatnog materijala postižu zadovoljavajuća mehanička i strukturna svojstva zavara, a isto tako uporaba austenitnog dodatnog materijala s porastom legirajućih elemenata snižava stupanj protaljivanja i miješanja. Kada bi se odabrao feritno-perlitni dodatni materijal, na strani austenitnog nehrđajućeg čelika, došlo bi do većeg protaljivanja što se objašnjava nižim talištem kao i nižom toplinskom provodljivošću austenitnog u odnosu na feritno-perlitni čelik. Kod neznatnog protaljivanja austenitnog čelika u perlitnim zavarima uočava se pojava krhke martenzitne strukture koja je sklona pukotinama stoga se primjena feritno-perlitnog ugljičnog dodatnog materijala pri zavarivanju raznorodnih čelika ne preporučuje. Bez obzira na potrebu kontrole protaljivanja, drugi čimbenici bitni za ovu posebnost također mogu utjecati na izbor dodatnog materijala. Ako su npr. tališta čelika koji se zavaruju vrlo različita (što je slučaj s feritno-perlitnim i austenitnim čelikom), temperatura skrućivanja metala zavara treba biti u osnovi bliža onoj od čelika s nižom temperaturom taljenja. U protivnom, ako temperatura skrućivanja metala zavara bitno premašuje temperaturu skrućivanja jedne komponente moguća je pojava toplih pukotina u zoni utjecaja topline materijala koji se posljednji skrućuje [22].

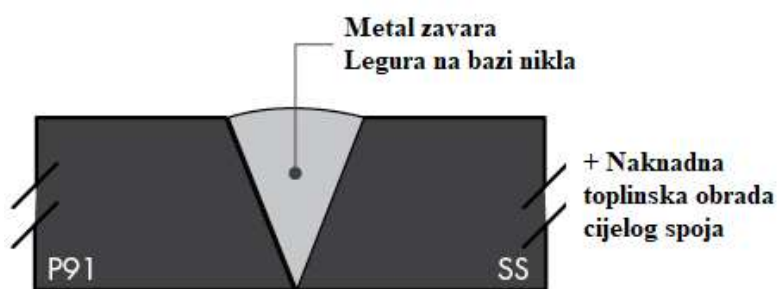
6.3.1. Spojevi čelika P91 s niskolegiranim feritnim čelicima

Kod zavarivanja čelika P91 s niskolegiranim feritnim čelicima mogu se koristiti dodatni materijali čiji kemijski sastav odgovara manje legiranom čeliku ili se može koristiti dodatni materijal koji odgovara čeliku P91 što je češći odabir. Međutim, treba uzeti u obzir već spomenute probleme nastale migracijom ugljika. Ovisno o razlici u sadržaju kroma između materijala, tijekom zavarivanja i toplinske obrade ugljik difundira iz materijala s nižim

sadržajem kroma u materijal s višim sadržajem kroma ili u metal zavara. Kao rezultat, zona osiromašena ugljikom se priključuje materijalu s nižim sadržajem kroma, a zona obogaćena ugljikom materijalu s višim sadržajem kroma. U zoni osiromašenoj ugljikom čvrstoća će biti manja, a u zoni obogaćenoj ugljikom će doći do stvaranja karbida, povećanja čvrstoće i smanjenja istežljivosti. Toplinska obrada kod spajanja čelika P91 i niskolegiranih feritnih čelika trebala bi biti izvedena u skladu sa specifikacijama niže legiranih čelika [32,33].

6.3.2. Spojevi čelika P91 s visokolegiranim austenitnim čelicima

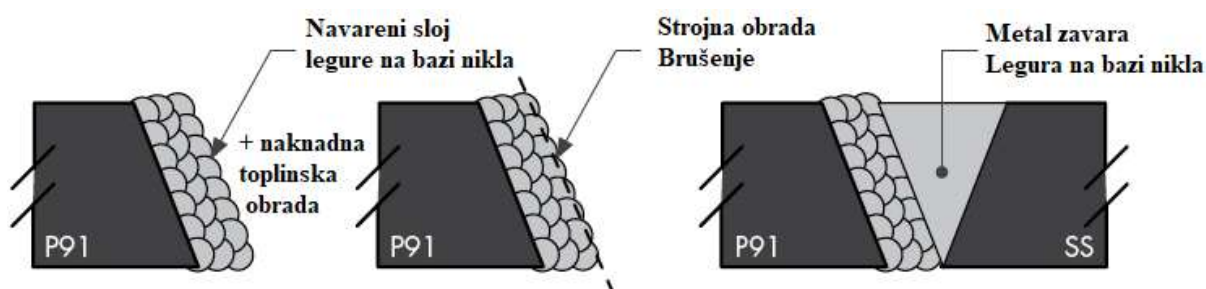
Kod zavarivanja čelika P91 s visokolegiranim austenitnim čelicima potrebno je koristiti dodatne materijale na bazi nikla. Postoje dva načina zavarivanja čelika P91 s austenitnim visokolegiranim čelicima, a koji će se način izabrati ovisi o debljini materijala koji će se zavariti. Kod tankih materijala spoj se najčešće izvodi direktnim zavarivanjem s dodatnim materijalom na bazi nikla, s time da se strana čelika P91 prije zavarivanja mora predgrijati na temperaturu 200 - 250 °C. Također, nakon zavarivanja cijeli spoj se mora podvrgnuti naknadnoj toplinskoj obradi prema uputama za čelik P91. Za ovaj način zavarivanja austenitni čelik mora biti stabiliziran ili s niskim udjelom ugljika, u cilju sprječavanja moguće pojave pukotina kod naknadne toplinske obrade. Na slici 21 dan je shematski prikaz spoja čelika P91 sa austenitnim čelikom izvedenim direktnim zavarivanjem sa dodatnim materijalom na bazi nikla te naknadnom toplinskom obradom cijelog spoja [32,33].



Slika 21. Zavarivanje sa dodatnim materijalom na bazi nikla i naknadna toplinska obrada cijelog spoja [32]

Bolji način za spajanje čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika, pogotovo ako je riječ od debljim materijalima, je izvođenjem prijelaznog spoja. Takav prijelazni spoj se izvodi navarivanjem legure na bazi nikla na P91 stranu spoja. Prije navarivanja čelik P91 potrebno je predgrijati na temperaturu 200 – 250 °C. Navareni sloj niklove legure zajedno sa čelikom P91

treba se naknadno toplinski obraditi prema uputama za čelik P91. Tako navareni sloj legure nikla na čeliku P91, nakon brušenja i toplinske obrade, služi kao osnova za zavarivanje s visokolegiranim austenitnim čelikom korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla te nije potrebno predgrijavanje kao niti naknadna toplinska obrada. Na slici 22 prikazan je takav način izvođenja spoja između čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika [32,33].



Slika 22. Zavarivanje čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika izvođenjem prijelaznog sloja navarivanjem legure na bazi nikla [32]

U tablici 11 dan je prikaz nekoliko dodatnih materijala na bazi nikla koji se mogu upotrijebiti za zavarivanje čelika P91 s visokolegiranim austenitnim čelicima.

Tablica 11. Dodatni materijali prikladni za zavarivanje čelika P91 i visokolegiranih austenitnih čelika te njihov kemijski sastav [34]

Oznaka (AWS)	Kemijski sastav dodatnog materijala												
	C	Mn	Fe	P	S	Si	Ti	Cu	Ni	Co	Cr	Mo	Cb/Ta (Nb+Ta)
ENiCrFe-2	max 0,1	1-3,5	max 12	max 0,03	max 0,02	max 0,75	-	max 0,5	min 62	max 0,12	13-17	0,5-2,5	0,5-3 (-)
ENiCrFe-3	max 0,1	5-9,5	max 10	max 0,03	max 0,015	max 1	max 1	max 0,5	min 59	max 0,12	13-17	-	1-2,5 (-)
ERNiCr-3	max 0,1	2,5-3,5	max 3	max 0,03	max 0,015	max 0,5	max 0,75	max 0,5	min 67	max 0,12	18-22	-	2-3 (-)
ERNiCrMo-3	max 0,1	max 0,5	max 5	max 0,02	max 0,015	max 0,5	max 0,4	max 0,5	min 58	-	20-23	-	- (3,15-4,15)

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad proveden je s ciljem određivanja kvalitete i svojstva zavarenog spoja čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika primjenom dodatnog materijala na bazi nikla i kroma (Inconel 625). Eksperimentalni rad je proveden u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Eksperiment je podijeljen na nekoliko dijelova. U prvom dijelu određeni su parametri za MIG navarivanje Inconel legure na cijevi čelika P91 te je provedeno navarivanje. Budući da čelik P91 zahtijeva obaveznu toplinsku obradu nakon zavarivanja, uzorci su podvrgnuti toplinskoj obradi. U drugom dijelu određeni su parametri za MIG zavarivanje ploče od visokolegiranog austenitnog čelika na navareni sloj Inconel legure te je provedeno zavarivanje. Provedena je vizualna kontrola zavarenih spojeva te su pripremljeni makroizbrusci i provedena daljnja ispitivanja, ispitivanje mikrostrukture i tvrdoće.

7.1. Korištena oprema za izradu eksperimentalnog rada

Navarivanje Inconel legure na cijevi izvedeno je automatiziranim MIG postupkom koji je uključivao automat za zavarivanje BUGO Systems MDS 1002 i izvor struje za zavarivanje Welbee P400. Pištolj za MIG zavarivanje pričvršćen je na automat za zavarivanje BUGO Systems MDS 1002 koji ima mogućnosti uzdužnog gibanja preko zubne letve paralelno uz radno mjesto te mogućnost namještanja željene udaljenosti pištolja od radnog komada i upravljenje brzinama zavarivanja što je važno zbog određivanja unosa topline. Na slici 23 prikazano je radno mjesto i uređaj za automatizirano MIG zavarivanje.



Slika 23. Radno mjesto s uređajem za automatizirano zavarivanje

Kao izvor za MIG zavarivanje korišten je uređaj Welbee P400 koji je razvila i proizvela tvrtka OTC Daihen. Welbee P400 je MIG/MAG aparat za zavarivanje sa sinergijskim funkcijama. Kod takvih uređaja potrebno je izabrati jedan parametar dok uređaj sam odabire ostale parametre. Navedeni izvor struje može isporučivati istosmjernu (DC) struju, impulsnu istosmjernu struju (DC PULSE) i istosmjernu valnu impulsnu struju (DC WAVE PULSE). Uređaj dolazi sa sustavom automatske dobave žice, a pogodan je za zavarivanje raznih vrsta materijala kao što su ugljični čelici, nehrđajući čelici, aluminij i aluminijske legure, titan, legure na bazi nikla (Inconel), bakrene legure i slično. Može se također koristiti za TIG i REL zavarivanje, a pogodan je za ručnu i robotsku upotrebu. Na slici 24 prikazan je izvor struje Welbee P400 koji se koristio pri izradi eksperimenta.



Slika 24. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400

Uređaj Welbee P400 ima ravnu statičku karakteristiku tj. konstantan napon struje (eng. Constant Voltage), što znači da izvor održava napon konstantnim dok se jačina struje mijenja s visinom električnog luka. Intermitencija uređaja je radni ciklus, a prikazuje maksimalno vrijeme tijekom kojeg je izvor struje sposoban isporučiti tražene izlazne parametre. Uređaj Welbee P400 koji je korišten tijekom eksperimenta može zavarivati pri maksimalnoj struji od 400 A 5 minuta, dok se kod struje od 283 A ne zagrijava tako jako pa ga je moguće koristiti i više od 10 minuta. Osim navedenih karakteristika, tablica 12 prikazuje i ostale karakteristike Welbee P400 izvora struje za zavarivanje.

Tablica 12. Karakteristike Welbee P400 izvora struje za zavarivanje [35]

Welbee P400	
Napon napajanja ($\pm 15\%$)	3 x 400 V
Frekvencija mreže	50/60 Hz
Radni napon	12 – 34 V
Raspon struje	30 – 400 A
Radni ciklus 10 min/40 °C	50 % na 400 A
Radni ciklus 10 min/40 °C	100 % na 283 A
Broj funkcija za zavarivanje	100
Okolišna temperatura	-10 °C do 40 °C
Dimenzije D/Š/V [mm]	710/395/592
Masa	62 kg
Statička karakteristika	Konstantan napon (eng. CV)

Prilikom izrade eksperimenta bilo je potrebno kontrolirati međuprolaznu temperaturu za što je korišten infracrveni termometar (Fluke 568 IR termometer) koji je prikazan na slici 25. Isti taj uređaj korišten je i kod provjere temperature predgrijavanja uzorka 2.



Slika 25. Fluke 568 IR termometar [36]

7.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal korištene su dvije cijevi čelika P91 dimenzija $\text{Ø}51 \times 6,3$ duljine 160 mm, koji se prema europskoj normi EN 10216-2 označava kao X10CrMoVNb9-1. Radi se o visokolegiranom martenzitnom čeliku koji se primjenjuje u kotlovskim i raznim energetskim postrojenjima prvenstveno zbog dobre otpornosti na puzanje na visokim temperaturama. U tablicama 13 i 14 prikazana su mehanička svojstva i kemijski sastav uzoraka, dok su na slici 26 prikazani uzorci prije navarivanja Inconel legure.

Tablica 13. Mehanička svojstva osnovnog materijala – čelik P91 [11]

Oznaka	Mehanička svojstva								
	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ² , pri °C							
		20	100	200	300	400	500	550	600
P91	620...850	450	410	380	360	340	300	270	215

Tablica 14. Kemijski sastav osnovnog materijala – čelik P91 [11]

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	Nb	N
0,08-0,12	0,2-0,5	0,3-0,6	≤ 0,02	≤ 0,01	≤ 0,04	8-9,5	0,85-1,05	≤ 0,4	0,18-0,25	0,06-0,1	0,03-0,07



Slika 26. Izgled uzoraka prije navarivanja Inconel legure

Tijekom izrade eksperimenta korištene su i dvije ploče od visokolegiranog austenitnog čelika AISI 304 (oznaka prema američkom standardu) koji se prema europskoj normi EN 10088-2 još označava i kao X5CrNi18-10. Dimenzije ploča su 124x84x10 mm, a jedna od ploča koje su korištene u eksperimentu prikazana je na slici 27.



Slika 27. Izgled ploče od čelika X5CrNi18-10

Visokolegirani austenitni čelik X5CrNi18-10 predstavlja najsvestraniji i najkorišteniji nehrđajući čelik. Ima odličnu korozivnu otpornost u različitim okruženjima i u kontaktu s različitim korozivnim medijima. Do rupičaste i korozije u procijepu može doći u okruženjima

koja sadrže kloride, dok pucanje uslijed napetostne korozije može nastupiti na temperaturama iznad 60 °C. Također, ovaj čelik je karakteriziran dobrom otpornošću prema oksidaciji u intermitentnom radu do 870 °C, odnosno u kontinuiranom radu do 925 °C [37].

Prije korištenja navedenog čelika njegov kemijski sastav utvrđen je u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Utvrđivanje kemijskog sastava provedeno je nerazornom metodom rendgenske fluorescentske spektrometrije (XRF) korištenjem uređaja XRF-Olympus, proizvođača Innov-X Systems. Slika 28 prikazuje uređaj kojim je provedeno utvrđivanje kemijskog sastava čelika X5CrNi18-10, a u tablici 15 prikazan je njegov točan kemijski sastav.



Slika 28. Utvrđivanje kemijskog sastava čelika X5CrNi18-10 korištenjem uređaja XRF-Olympus

Tablica 15. Točan kemijski sastav korištenog čelika X5CrNi18-10

Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
0,8	0,12	0,1	17,73	1,18	71,64	0,54	7,87	0,043

Ovaj čelik je dobro zavarljiv svim postupcima zavarivanja kod kojih se prijenos materijala ostvaruje električnim lukom. U tablici 16 prikazana su neka osnovna mehanička svojstva ovog čelika.

Tablica 16. Osnovna mehanička svojstva čelika X5CrNi18-10 [37]

Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezanje, %	Tvrdoća po Brinellu
500 – 700	min 190	min 45	max 215

Kao dodatni materijal tijekom postupaka navarivanja i zavarivanja korištena je puna žica naziva Inconel 625, promjera 1,2 mm. To je žica na bazi nikla i kroma, a prema AWS A5.14 normi još se označava i kao ERNiCrMo-3. Može se koristiti kod MIG/MAG i TIG postupka zavarivanja legura Inconel 625, Incoloy 825, Incoloy 25-6MO i niz visokočvrstih austenitnih nehrđajućih čelika. Takve žice su prikladne i za zavarivanje raznorodnih spojeva kao što su spojevi nelegiranih/niskolegiranih čelika s austenitnim čelicima i sl. Isto tako, koriste se i za prevlačenje čelika. Legure Inconel 625 zadržavaju visoku čvrstoću u širokom rasponu temperatura te zadržavaju otpornost na lokalnu koroziju kao što je rupičasta ili korozija u procjepu [38]. U tablici 17 prikazan je približan kemijski sastav žice Inconel 625, a osnovna mehanička svojstva prikazana su u tablici 18.

Tablica 17. Približan kemijski sastav žice Inconel 625 [38]

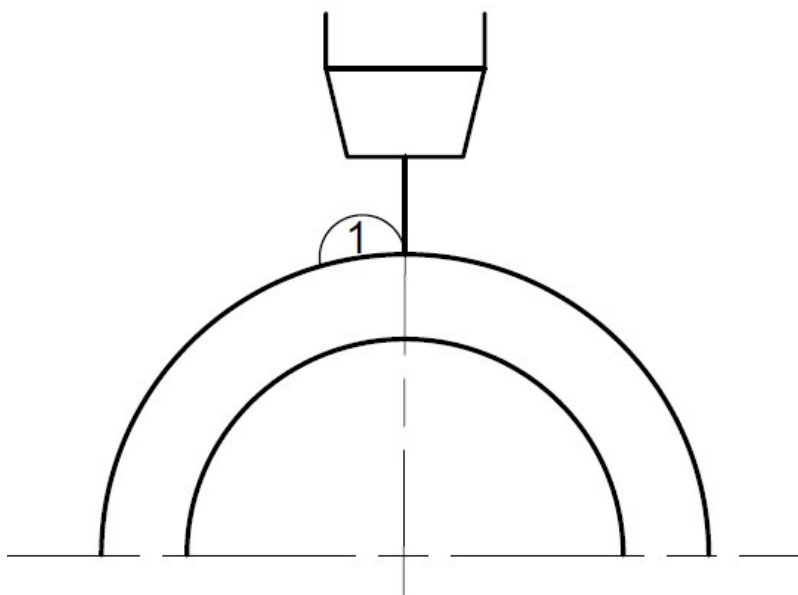
	Ni+Co	C	Mn	Fe	S	Cu	Si	Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo	P
Min,%	58	-	-	-	-	-	-	-	-	20	3,15	8	-
Max,%	-	0,1	0,5	1	0,015	0,5	0,5	0,4	0,4	23	4,15	10	0,02

Tablica 18. Osnovna mehanička svojstva žice Inconel 625 [38]

Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezanje, %
724	448	30

7.3. Postupak navarivanja Inconel 625 materijala na cijevi čelika P91

Prije navarivanja legure Inconel 625 na cijevi čelika P91, površine cijevi (uzoraka) očišćene su alkoholom. Jedan od uzoraka (uzorak 2) prije navarivanja Inconel legure bio je predgrijan na temperaturu od 250 °C (izmjereno Fluke 568 IR termometrom), dok se na drugi uzorak navarivao sloj Inconela 625 bez predgrijavanja uzorka. Time se htjelo vidjeti imali li temperatura predgrijavanja ikakvog utjecaja na kvalitetu dobivenog spoja budući da prema brojnim literaturnim podacima čelik P91 zahtijeva obavezno predgrijavanje. Slika 29 prikazuje skicu položaja pištolja i žice za zavarivanje prije svakog novog prolaza. Pištolj za zavarivanje uvijek je na istom mjestu, a cijevi se prilikom svakog novog prolaza namještaju tako da žica udara u sam kraj prethodno navarenog sloja.



Slika 29. Skica položaja pištolja i žice za zavarivanje prije svakog novog prolaza

Uzorci su na radno mjesto postavljeni tako da se tijekom jednog prolaza pištolja za zavarivanje legura Inconel navari na oba uzorka. Električni luk uvijek se uspostavlja na istim krajevima uzoraka tj. svaki novi prolaz počeo je na desnoj strani, a završio na lijevoj strani uzoraka. Na slici 30 vidi se položaj uzoraka tijekom navarivanja.



Slika 30. Položaj uzoraka tijekom navarivanja

7.3.1. Parametri navarivanja

Prije početka navarivanja na upravljačkom sučelju izvora struje za zavarivanje postavljeni su osnovni parametri zavarivanja. Jakost struje postavljena je na 150 A, a uređaj za zavarivanje automatski prema sinergijskoj krivulji podešava napon koji je za zadanu jakost struje iznosio 22,5 V. Brzina dodavanja žice iznosila je 5 m/min, a brzina zavarivanja je konstantna i iznosila je 30 cm/min. Slobodni kraj žice postavljen je na 12 mm. Dodatni materijal je žica Inconel 625 promjera 1,2 mm, a korišten je impulsni način prijenosa metala. Korišteni plin je Argon 5.0 (100 % Ar) proizvođača Messer, a njegov protok postavljen je na 18 l/min. Navarivanje je izvedeno neutralnom tehnikom, a pištolj za zavarivanje je bio nagnut približno pod 90°. Na slici 31 prikazano je upravljačko sučelje izvora struje za zavarivanje s postavljenim osnovnim parametrima.



Slika 31. Upravljačko sučelje izvora struje za zavarivanje s postavljenim osnovnim parametrima

Prilikom svakog novog prolaza uzorci se zbog unosa topline električnim lukom zagrijavaju, a cilj je bio održati međuprolaznu temperaturu nižom od 300 °C. Prije svakog novog prolaza temperatura je provjerena Fluke 568 IR termometrom. Prilikom svakog prolaza bilježeni su parametri zavarivanja (jakost struje i napon) te je za svaki prolaz izračunat unos topline.

Unesena toplina računa se prema sljedećem izrazu [39]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} \quad (5)$$

gdje je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

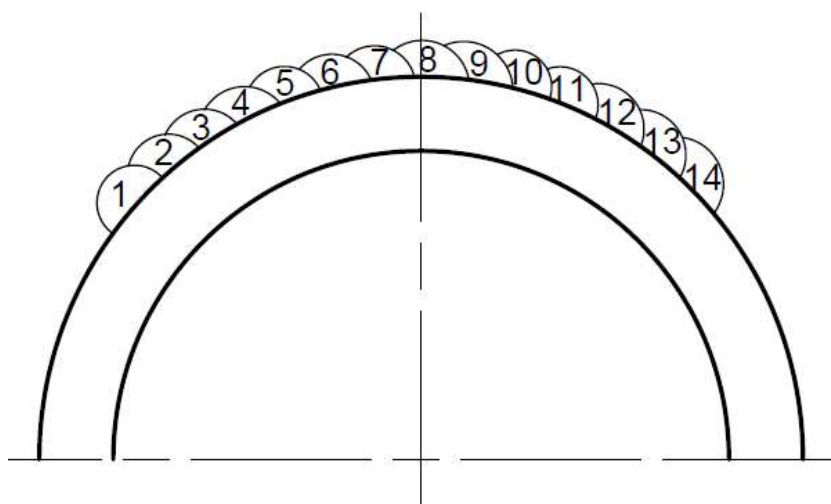
k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MIG/MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, cm/min.

Slika 32 prikazuje skicu s redosljedom i brojem prolaza kod navarivanja Inconel 625 dodatnog materijala. Isti redosljed i broj prolaza navaren je na oba uzorka.



Slika 32. Redosljed i broj prolaza kod navarivanja Inconel-a 625 na uzorke čelika P91

Tablica 19 sadrži parametre zavarivanja (jakost struje i napon) i izračunate unose topline bilježene prilikom svakog prolaza. Brzina zavarivanja je konstantna i iznosi 30 cm/min.

Tablica 19. Parametri zavarivanja bilježeni prilikom svakog prolaza

Prolaz	Uzorak 1 (bez predgrijavanja)			Uzorak 2 (predgrijan na 250 °C)		
	Jakost struje, A	Napon, V	Unos topline, kJ/cm	Jakost struje, A	Napon, V	Unos topline, kJ/cm
1.	146	23,7	5,54	148	23,1	5,47
2.	145	23,8	5,52	145	23,8	5,52
3.	146	23,7	5,54	144	24,1	5,55
4.	145	23,8	5,52	145	23,6	5,48
5.	146	23,7	5,54	146	23,8	5,56
6.	145	23,7	5,50	144	24,1	5,55
7.	146	23,7	5,54	145	23,7	5,50
8.	145	23,7	5,50	144	24,1	5,55
9.	145	23,8	5,52	145	23,9	5,54
10.	146	23,6	5,51	146	23,7	5,54
11.	146	23,7	5,54	146	23,8	5,56
12.	145	23,8	5,52	145	24,1	5,59
13.	146	23,9	5,58	144	23,9	5,51
14.	144	24,1	5,55	145	24,1	5,59

Na slikama 33 i 34 prikazani su uzorci nakon navarivanja Inconel legure.



Slika 33. Izgled uzoraka nakon navarivanja – pogled odozgo



Slika 34. Izgled uzoraka nakon navarivanja – pogled s bočne strane

Iz slika 33 i 34 vidljivo je da je izgled navarenog sloja kod oba uzorka gotovo identičan, što je i logično budući da su korišteni isti parametri zavarivanja. Temperatura predgrijavanja od 250 °C kod uzorka 2 nema utjecaja na izgled navarenog sloja. Korištenjem pomičnog mjerila na nasumično izabranim mjestima uzorka izmjereno je nekoliko visina navarenog sloja. To se provodilo na način da je izmjeren promjer cijevi s navarenim slojem Inconel materijala koji je

oduzet s osnovnim promjerom cijevi, a dobiveni broj predstavlja visinu navarenog sloja. Slika 35 prikazuje indirektno mjerenje visine navarenog sloja.



Slika 35. Indirektno mjerenje visine navarenog sloja

U tablici 20 prikazane su izmjerene visine navarenog sloja kod oba uzorka.

Tablica 20. Izmjerene visine navarenog sloja

Broj mjerenja	Uzorak 1 (bez predgrijavanja)	Uzorak 2 (predgrijan na 250 °C)
1.	4,5 mm	4,4 mm
2.	4 mm	4,1 mm
3.	4,1 mm	4,5 mm
4.	4,1 mm	4,1 mm
5.	4,2 mm	4,2 mm
6.	4,4 mm	4 mm
7.	4,1 mm	4,4 mm
8.	4,2 mm	4,3 mm
9.	4,1 mm	4,1 mm
10.	4,2 mm	4,1 mm
11.	4,3 mm	4,1 mm
Srednja vrijednost	4,20 mm	4,21 mm

Iz tablice 20 vidljivo je da je srednja vrijednost visine navarenog sloja Inconel materijala kod oba uzorka gotovo ista. Kod uzorka 1 ona iznosi 4,20 mm, dok kod uzorka 2 iznosi 4,21 mm, što je neznatno odstupanje. Također, korištenjem pomičnog mjerila izmjerena je i širina navarenog sloja kod oba uzorka, a ona je kod oba uzorka identična te iznosi 65 mm.

7.3.2. Toplinska obrada uzoraka

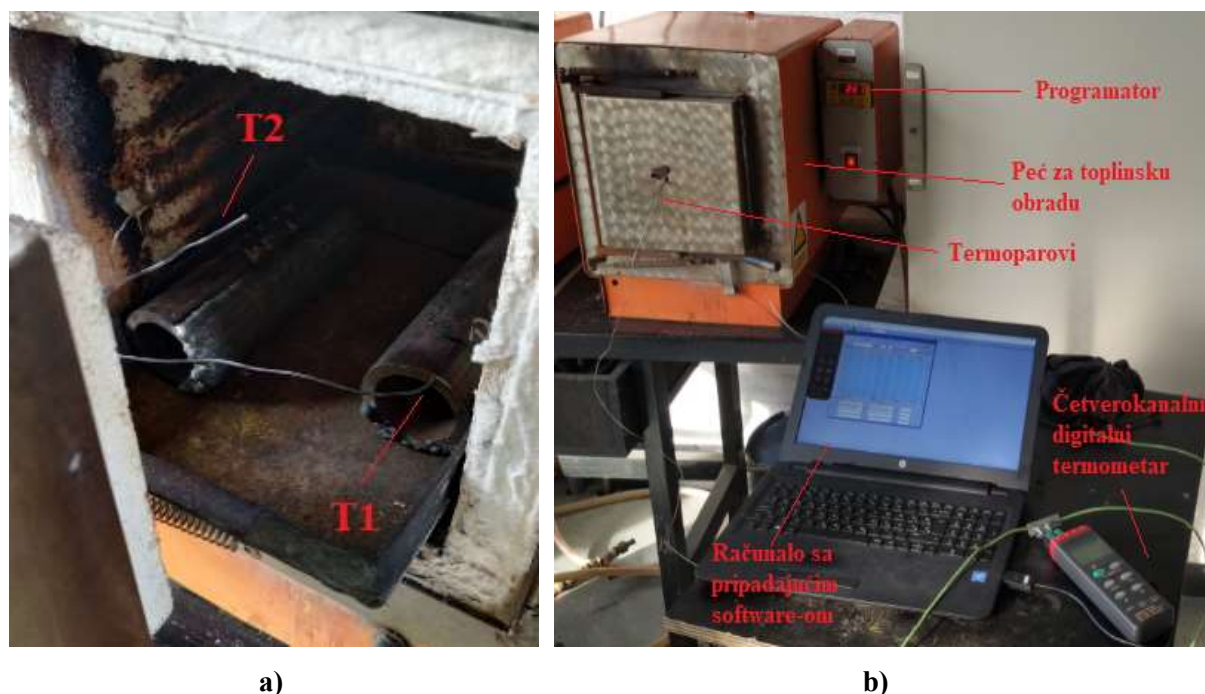
Nakon što je završeno navarivanje, uzorci sa navarenim slojem Inconel materijala toplinski su obrađeni u Laboratoriju za toplinsku obradu prema specifikacijama za čelik P91. Prije provođenja toplinske obrade na uzorku 2 u osnovnom materijalu čelika P91 izbušen je provrt $\varnothing 2$ mm. Provrt je izbušen kako bi se prilikom toplinske obrade pomoću termopara mogla pratiti temperatura u materijalu uzorka. Korištena su dva termopara promjera $\varnothing 1,5$ mm, jedan za mjerenje temperature u materijalu uzorka (T1), a drugi za mjerenje ambijentalne temperature unutar peći (T2). Termoparovi su K tipa (NiCrNi), a spojeni su na četverokanalni digitalni termometar TC309 koji je prikazan na slici 36.



Slika 36. Četverokanalni digitalni termometar TC309 [40]

Ovaj četverokanalni digitalni termometar ima mogućnost istovremenog priključka do 4 termopara, a napajan je baterijom te dolazi s vlastitom memorijom u koju je moguće pohraniti do 16 000 mjernih vrijednosti (4 000 po kanalu). Zbog mogućnosti pohranjivanja mjernih vrijednosti u vlastitu memoriju, uređaj je pogodan za mjerenja na terenu. Mjerno područje uređaja je od -200 °C do $+1370$ °C. Uređaj dolazi i s pripadajućim programskim paketom naziva Computer Linking Software koji omogućava iščitavanje, analizu i obradu podataka na računalo. Četverokanalni digitalni termometar TC309 spajanjem na računalo djeluje kao posrednik između termoparova i računala prilikom iščitavanja podataka na računalo [40].

Na slici 37 a) prikazani su termoparovi za mjerenje temperature i uzorci stavljeni u peć za toplinsku obradu, a na slici 37 b) prikazana je sva oprema koja se koristila kod provedbe toplinske obrade.



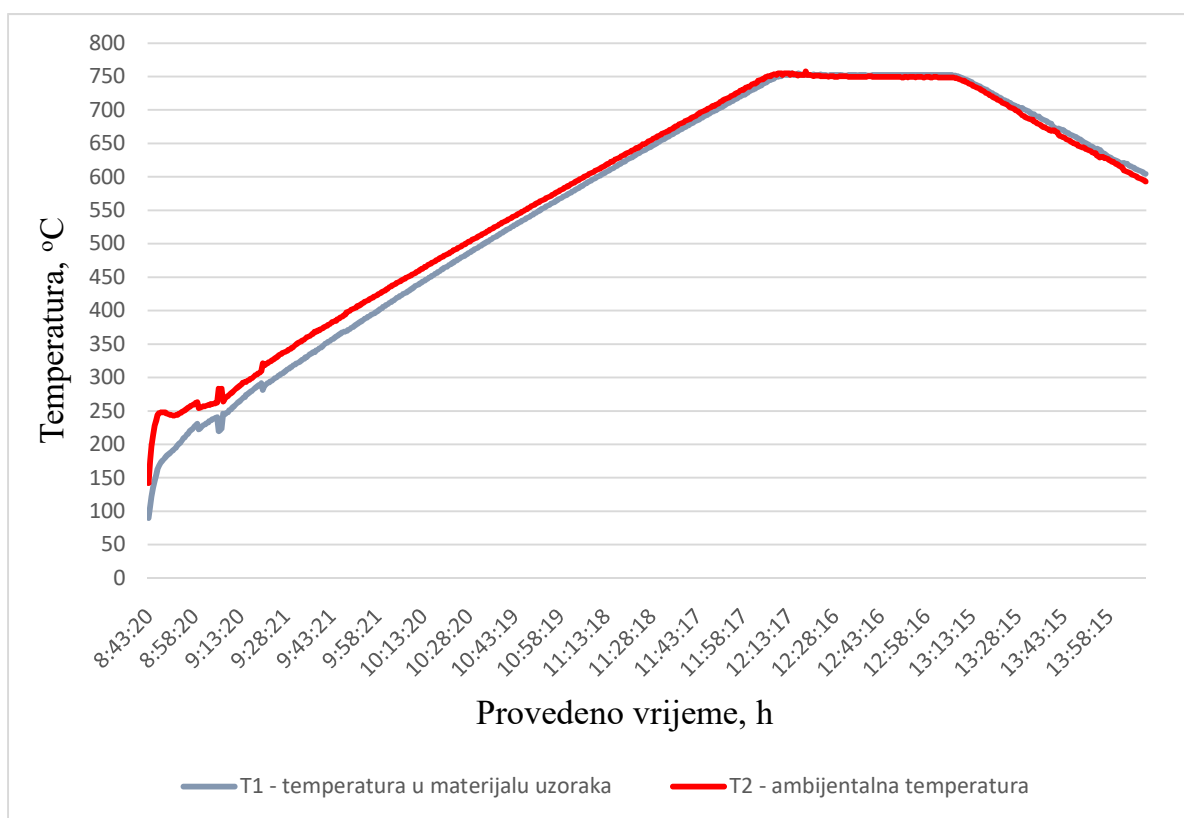
Slika 37. a) Termoparovi za mjerenje temperature i uzorci stavljeni u peć za toplinsku obradu;
b) korištena oprema kod provedbe toplinske obrade

U tablici 21 prikazani su parametri provedene toplinske obrade koji se unose pomoću programatora koji se nalazi na peći za toplinsku obradu.

Tablica 21. Parametri toplinske obrade

Materijal	čelik P91 (X10CrMoVNb9-1)
Dimenzije	Ø51x6,3 duljina 160 mm
Brzina grijanja	150 °C/h
Brzina hlađenja	150 °C/h
Temperatura držanja	750 °C
Vrijeme držanja	60 min
Dodatna uputstva: uzorke staviti na 300 °C; hladiti do sobne temperature	

Slika 38 prikazuje dijagram koji pokazuje kako se mijenjala temperatura u materijalu uzoraka mjerena termoparom T1 i ambijentalna temperatura mjerena termoparom T2 tijekom toplinske obrade. Dijagrami su dobiveni iz podataka nastalih bilježenjem temperatura u određenim vremenskim intervalima pomoću opreme za mjerenje temperature (termoparovi, četverokanalni digitalni termometar) i pripadajućeg programskog paketa.



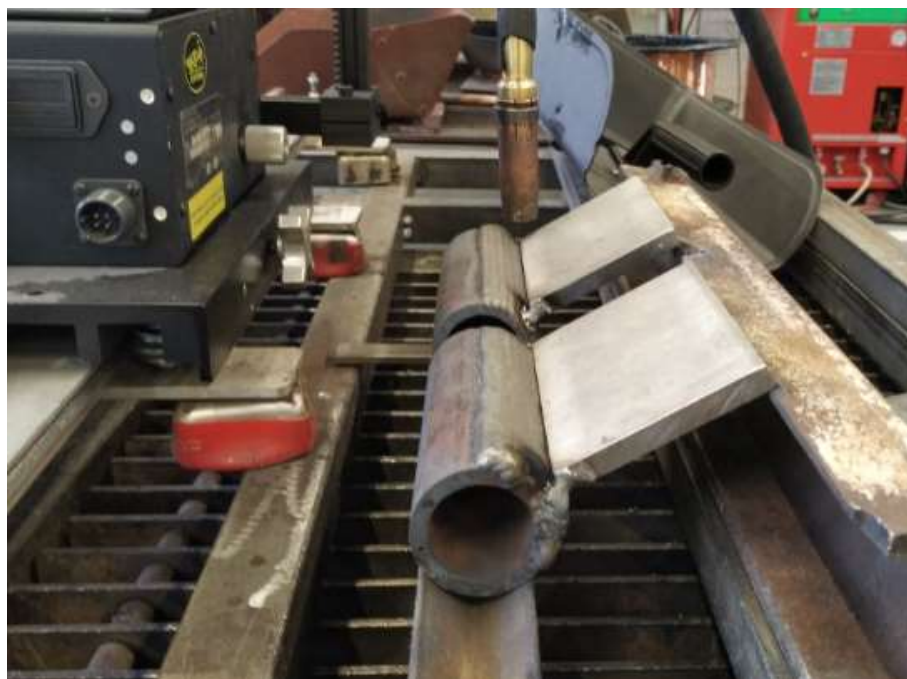
Slika 38. Dijagram promjene ambijentalne temperature i temperature u materijalu uzoraka

Iz dijagrama na slici 38 vidi se da u početku grijanja ambijentalna temperatura raste nešto brže nego temperatura u materijalu uzoraka što je i normalno jer je potrebno neko vrijeme da se materijal uzoraka progrije. Uzorci su prije stavljanja u peć bili držani na sobnoj temperaturi, a temperatura unutar peći prije stavljanja uzoraka iznosila je 300 °C zbog toga je najveća razlika u temperaturama u početku grijanja, a kasnije se temperature polako izjednačavaju. Temperatura u materijalu uzoraka i ambijentalna temperatura potpuno se izjednačavaju na temperaturi držanja od 750 °C. Na toj temperaturi uzorci su držani 1 h. Za proces hlađenja vrijedi obrnuto. Ambijentalna temperatura pada brže nego temperatura u materijalu uzoraka. Iz

dijagrama je vidljivo da je vrijeme potrebno za zagrijavanje uzoraka do temperature držanja od 750 °C iznosilo oko 3 h i 30 min. Navedeni uzorci hlađeni su do sobne temperature.

7.4. Zavarivanje ploče od austenitnog čelika na navareni sloj Inconela

Nakon što su uzorci toplinski obrađeni, površine navarenog sloja i ploče od austenitnog čelika koje će se zavarivati na uzorke, očišćene su alkoholom i četkom od nehrđajućeg čelika. Na pločama od austenitnog čelika nisu rađene nikakve dorade (skošenja) te nije provedena nikakva posebna priprema spoja. Ploče su postavljene tako da naliježu na navareni sloj od Inconel materijala, a zbog radijusa cijevi sa svake strane postoji mala zračnost. Prije zavarivanja, ploče od austenitnog čelika pripojene su na toplinski obrađene uzorke i zajedno s uzorcima postavljene u odgovarajući položaj na radno mjesto (PA položaj zavarivanja prema normi ISO 6947). Slika 39 prikazuje položaj uzoraka u kojem je provedeno zavarivanje.



Slika 39. PA položaj zavarivanja prema ISO 6947

7.4.1. Parametri zavarivanja

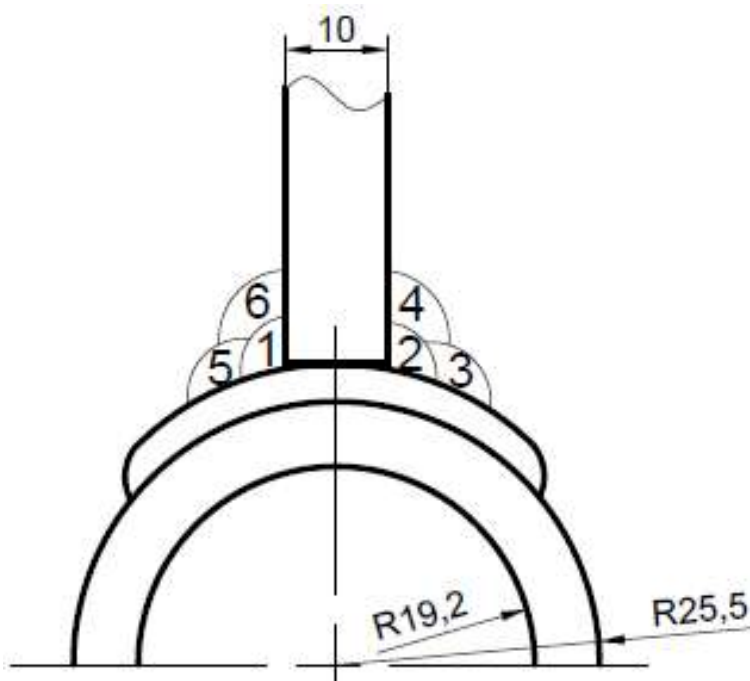
Prije početka zavarivanja postavljeni su osnovni parametri zavarivanja. U ovom slučaju jakost struje postavljena je na 180 A, a napon je iznosio 23,7 V. Brzina dodavanja žice iznosila je 6 m/min, a slobodni kraj žice postavljen je kao i kod navarivanja na 12 mm. Korišten je isti dodatni materijal kao i kod navarivanja (Inconel 625 - Ø1,2 mm), a korišten je i isti zaštitni plin jednakog protoka (Argon 5.0 - 18 l/min). Niti jedan od uzoraka prije zavarivanja nije se

predgrijavao. Zavarivanje je provedeno uz impulsni način prijenosa metala, a međuprolazna temperatura se održavala ispod 200 °C. Slika 40 prikazuje provjeru međuprolazne temperature Fluke 568 IR termometrom.



Slika 40. Provjera međuprolazne temperature Fluke 568 IR termometrom

Na slici 41 prikazana je skica zavarenog spoja ploče od austenitnog čelika i cijevi od čelika P91 sa brojem i redoslijedom prolaza.



Slika 41. Redoslijed i broj prolaza kod zavarivanja

Redosljed i broj prolaza jednak je na oba uzorka. Iako kod svakog prolaza postoji penetracija u osnovni materijal, na slici 41 zbog jednostavnosti prikaza to nije prikazano. Treba napomenuti da su 1., 2., 3., i 4. prolaz kod oba uzorka izvedeni uz ranije navedene jakosti struje i napona te uz pomoć automata za zavarivanje BUGO Systems MDS 1002. Kod navedenih prolaza korištena je neutralna tehnika, pištolj je bio pod kutem od 90°, a brzina zavarivanja iznosila je 30 cm/min. 5. i 6. prolaz izveden je ručnim MIG postupkom uz iste vrijednosti struje i napona, ali uz tehniku njihanja. Time se ispitivao utjecaj tehnike zavarivanja na izgled zavarenog spoja. Kod ručnog zavarivanja 5. i 6. prolaza izračunata je brzina zavarivanja koja je iznosila 25 cm/min. Tijekom izvođenja svakog od prolaza bilježeni su parametri zavarivanja budući da uslijed zavarivanja dolazi do odstupanja od namještenih vrijednosti. U tablici 22 prikazani su parametri zavarivanja i vrijednosti unosa topline za svaki prolaz.

Tablica 22. Parametri zavarivanja za svaki prolaz

Prolaz	Uzorak 1			Uzorak 2		
	Jakost struje, A	Napon, V	Unos topline, kJ/cm	Jakost struje, A	Napon, V	Unos topline, kJ/cm
1.	168	26,3	7,07	161	27,2	7,01
2.	163	27,6	7,20	164	26,9	7,06
3.	161	27,8	7,16	162	27,7	7,18
4.	163	27,7	7,22	162	27,6	7,15
5.	158	29,1	8,83	159	28,9	8,82
6.	158	29,3	8,89	160	28,3	8,70

Iz tablice 22 vidljivo je da 5. i 6. prolaz karakterizira veći unos topline. To je zbog toga što je kod tih prolaza brzina zavarivanja manja (ručni MIG postupak uz tehniku njihanja), a manja brzina uz isti napon i struju znači i veći unos topline. Slikama 42 i 43 prikazan je zavareni spoj uzorka 1, a slikama 44 i 45 uzorka 2.



Slika 42. Uzorak 1 – prva strana; automatizirani MIG, neutralna tehnika



Slika 43. Uzorak 1 – druga strana; ručni MIG, tehnika njihanja



Slika 44. Uzorak 2 – prva strana; automatizirani MIG, neutralna tehnika



Slika 45. Uzorak 2 – druga strana; ručni MIG, tehnika njihanja

Odmah nakon zavarivanja provedena je i vizualna kontrola uzoraka. Vizualna kontrola pripada jednoj od nekoliko nerazornih metoda ispitivanja, a njezin cilj je brzo i efikasno otkrivanje raznih površinskih grešaka. Odmah se može primijetiti da je izgled zavarenog spoja estetski prihvatljiviji kod zavarivanja ručnim MIG postupkom. To je vidljivo kod oba uzorka. Razlog tome je korištena tehnika njihanja, kao i veći unos topline. Uz veći unos topline i tehniku njihanja dodatni materijal Inconel 625 pokazuje bolje kvašenje na površini što za rezultat ima estetski prihvatljiviji izgled i geometriju zavarenog spoja. Također, kod zavarivanja strane spoja kod kojeg je korišten automatizirani MIG postupak s neutralnom tehnikom, vidljiva je pojava zajedno mjestimično uz zavar kod oba uzorka.

7.5. Izrada makroizbrusaka

Nakon vizualne kontrole zavarenih spojeva potrebno je na zavarenim uzorcima označiti mjesta na kojima će se izrezivati makroizbrusci na kojima će se provoditi analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće. Nakon označavanja, izrezan je po jedan makroizbrusak širine 25 mm iz svakog uzorka. Rezanje makroizbrusaka provedeno je na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje. Slika 46 prikazuje izrezivanje makroizbrusaka tračnom pilom.



Slika 46. Izrezivanje makroizbrusaka tračnom pilom

Izrezane makroizbruske potrebno je brusiti kako bi se dobila površina sa što manje površinskih nepravilnosti prije poliranja. Makroizbrusci su ručno brušeni brusnim papirima sljedećih granulacija:

- P80,

- P100,
- P200.

Sljedeći korak u izradi makroizbrusaka proveden je u Laboratoriju za materijalografiju, a sastojao se od brušenja makroizbrusaka na stroju za brušenje i poliranje Phoenix Alpha Grinder Polisher. Brzina vrtnje iznosila je 300 okr/min, a korišteni su brusni papiri sljedećih granulacija:

- P320,
- P500,
- P1000,
- P2400,
- P4000.

Prilikom brušenja, kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje koristila se voda. Nakon završenog brušenja, uzorci su isprani vodom kako bi se uklonile nečistoće te su prebačeni na uređaj DAP-V gdje su polirani. Brzina vrtnje kod poliranja iznosila je 150 okr/min, a kao sredstvo podmazivanja i hlađenja ne koristi se voda kao kod brušenja nego lubrikant. Postoje dva koraka poliranja. Kod prvog koraka korištena je dijamanta pasta od 3 μm , a kod drugog koraka dijamanta pasta od 1 μm . Uzorci su brušeni i polirani uz primjenu ručne sile.

Za makrostrukturnu i mikrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi u Laboratoriju za zaštitu materijala. Provedeno je elektrokemijsko nagrizanje u 10 % - tnoj oksalnoj kiselini u vremenskom razdoblju od 2 minute, pri naponu 4 V i struji od 2 A.

7.5.1. Analiza makrostrukture

Izradom makroizbrusaka te pravilnim brušenjem, poliranjem i nagrizanjem, dobiva se uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu taljenja materijala te intenzitet taljenja osnovnog materijala. Na slikama 47 i 48 prikazani su dobiveni makroizbrusci na kojima se jasno vide prolazi zavarivanja te dubina penetracije.



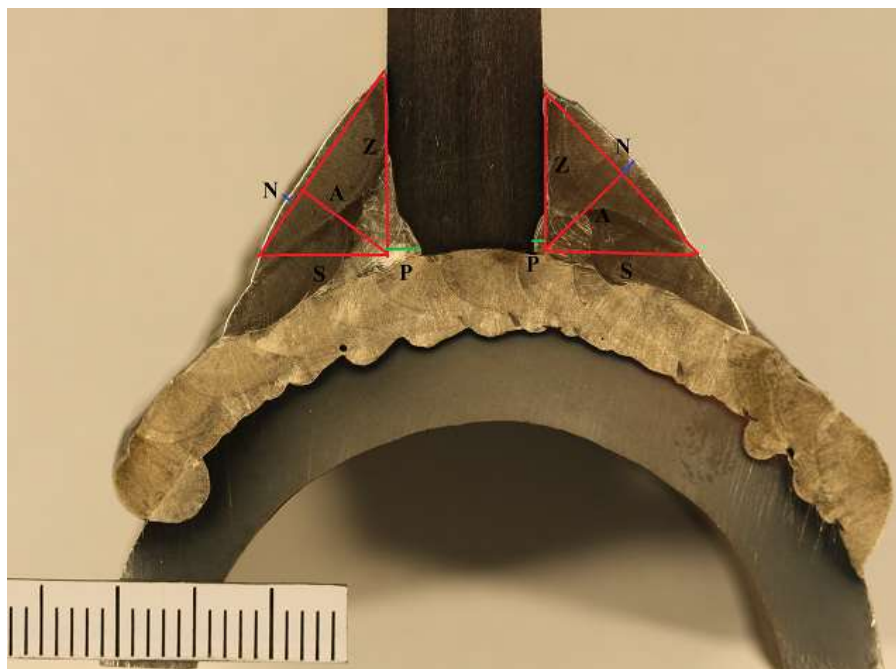
Slika 47. Makroizbrusak uzorka 1



Slika 48. Makroizbrusak uzorka 2

Na makroizbruscima golim okom jasno su vidljivi prolazi zavarivanja. Zona utjecaja topline između navarenog sloja Inconela i čelika P91 vrlo je uska, isto kao i između austenitnog čelika X5CrNi18-10 i metala zavara. Penetracija s bočnih strana u osnovni materijal čelika X5CrNi18-10 je vrlo mala, tek nešto veća penetracija vidljiva je u korijenskim prolazima. Navareni sloj Inconela na cijev čelika P91 pravilno je izveden bez naljepljivanja. Vizualnom kontrolom

makroizbrusaka nisu primijećene pogreške. Programom „ImageJ“ izmjerene su visine zavora, nadvišenja te penetracija. Program mjeri duljine na način da se kalibrira pomoću poznate dužine sa slike i iz te dužine izračuna duljinu piksela na osnovu čega dalje mjeri bilo koju dužinu sa slike. Na slici 49 prikazane su karakteristične dimenzije zavora makroizbruska 1.



Slika 49. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavora makroizbruska 1

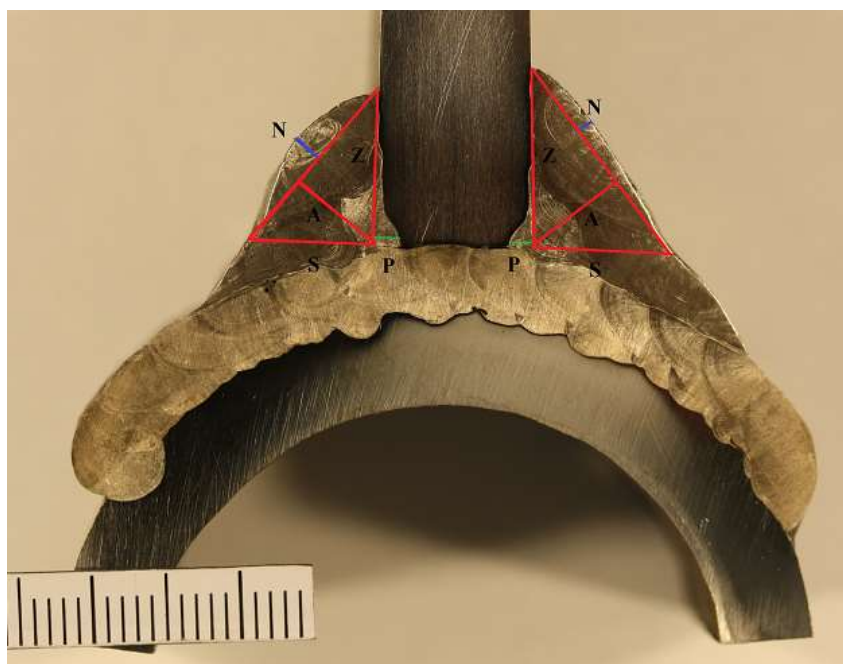
U tablici 23 prikazane su vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora makroizbruska 1.

Tablica 23. Karakteristične dimenzije zavora makroizbruska 1

Makroizbrusak 1			
Lijeva strana (tehnika njihanja – ručni MIG)		Desna strana (neutralna tehnika – auto. MIG)	
Z, mm	12,22	Z, mm	10,46
S, mm	8,43	S, mm	10,01
A, mm	6,82	A, mm	6,94
N, mm	0,93	N, mm	1,25
P, mm	1,98	P, mm	0,65

Visina zavora s desne strane (6,94 mm) veća je od zavora s lijeve strane (6,82 mm). Također, s desne strane je veće nadvišenje zavora (1,25 mm) za razliku od lijeve strane (0,93 mm). Razlog tome može biti tehnika njihanja koja se koristila kod lijeve strane, što daje ujednačeniji zavar s

manjim nadvišenjem. S lijeve strane spoja je veća penetracija u osnovni materijal. Na slici 50 prikazane su karakteristične dimenzije zavora makroizbruska 2.



Slika 50. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavora makroizbruska 2

U tablici 24 prikazane su vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora makroizbruska 2.

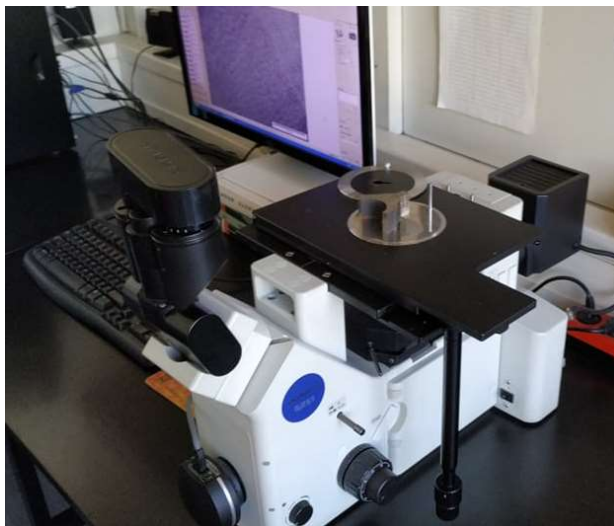
Tablica 24. Karakteristične dimenzije zavora makroizbruska 2

Makroizbrusak 2			
Lijeva strana (neutralna tehnika – auto. MIG)		Desna strana (tehnika njihanja – ručni MIG)	
Z, mm	10,27	Z, mm	11,91
S, mm	8,36	S, mm	9,36
A, mm	6,44	A, mm	6,94
N, mm	2,06	N, mm	1,22
P, mm	2,01	P, mm	1,71

Kod makroizbruska 2 primjećeno je veće nadvišenje kod strane spoja izvođenog automatiziranim MIG postupkom, isto kao i kod makroizbruska 1. Maksimalna penetracija nalazi se u korijenskom zavaru sa lijeve strane te iznosi 2,01 mm. Ručno MIG zavarivanje s tehnikom njihanja i kod ovog makroizbruska dalo je ljepši izgled zavora.

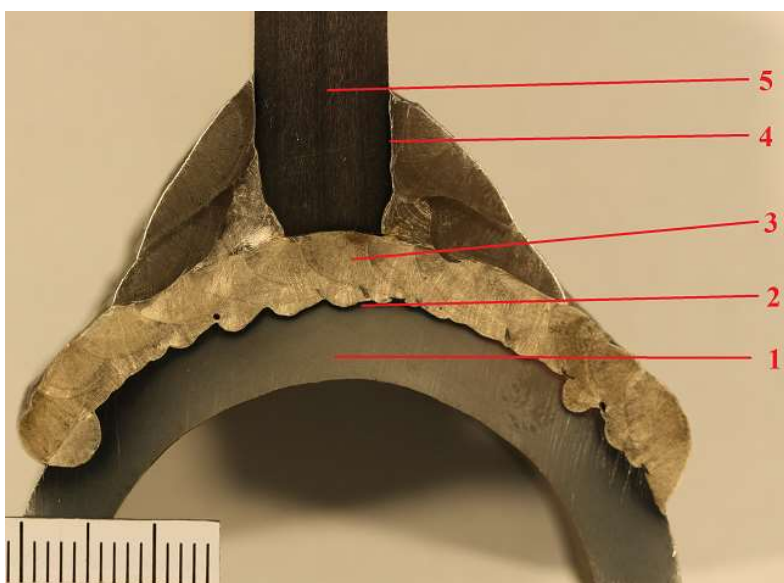
7.5.2. Analiza mikrostrukture

Mikrostruktura makroizbrusaka analizirana je svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 u Laboratoriju za materijalografiju. Uvećanje mikroskopa je u rasponu od 50 do 1000 puta i ima sposobnost razlučivanja mikrostrukturnih dijelova do $0,2\ \mu\text{m}$. Na slici 51 prikazan je svjetlosni mikroskop na kojem su provedena ispitivanja mikrostrukture.



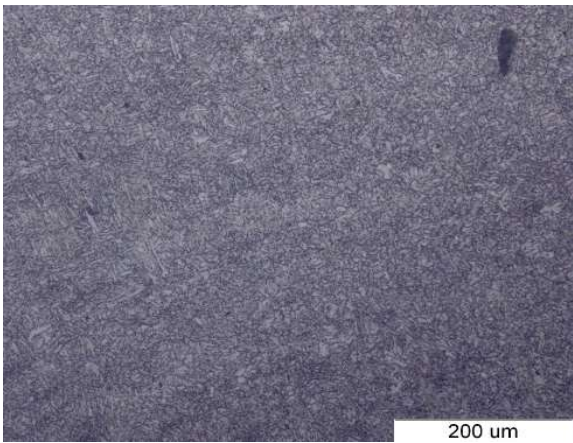
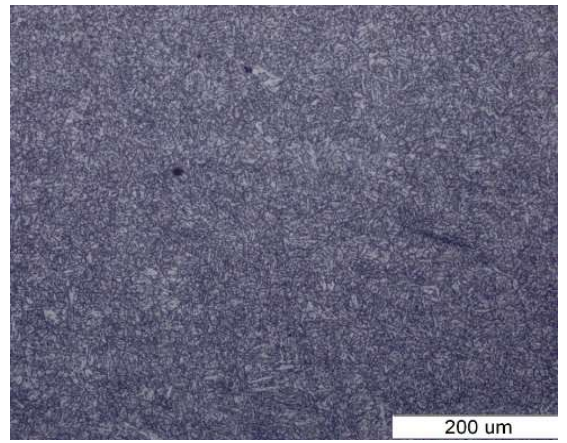
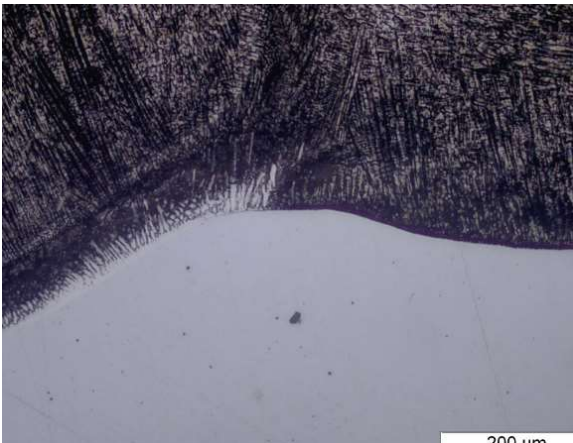


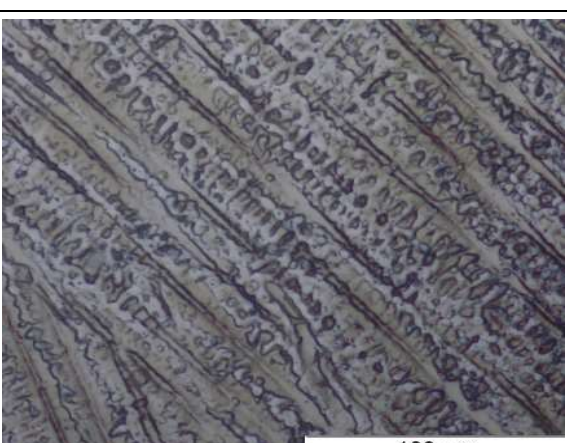
Slika 51. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Na uzorcima je analizirana mikrostruktura na pet mjesta. Analizirana je mikrostruktura čelika P91, mjesto uz liniju staljivanja P91 i Inconel-a, mikrostruktura samog Inconel-a te mjesto staljivanja Inconel-a sa X5CrNi18-10 čelikom kao i mikrostruktura samog čelika X5CrNi18-10. Slika 52 prikazuje mjesta na kojima su analizirane mikrostrukture.

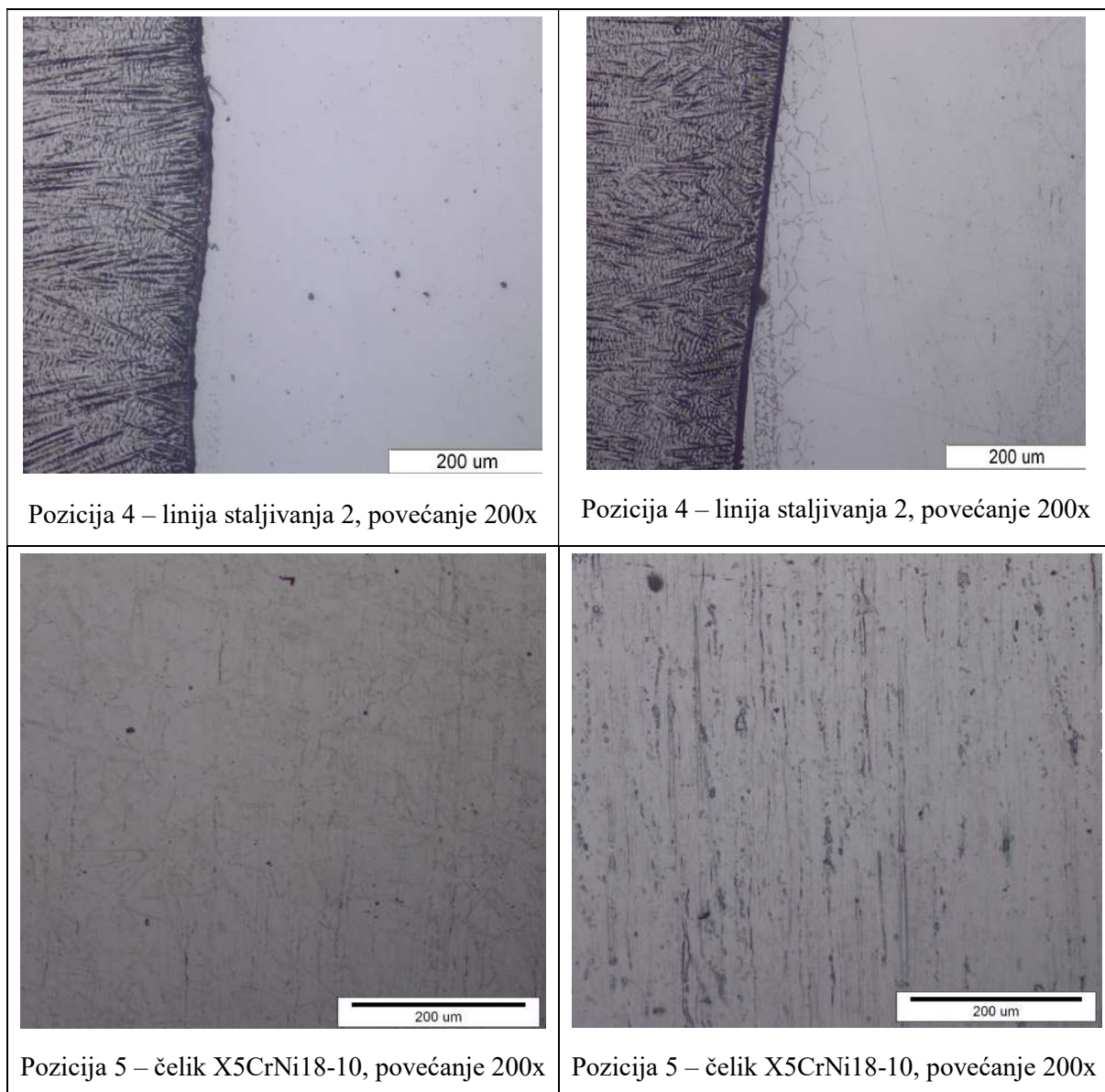


Slika 52. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura

Tablica 25. Mikrostrukture karakterističnih dijelova zavarenog spoja uzorka 1 i 2

Makroizbrusak 1	Makroizbrusak 2
 <p data-bbox="263 795 726 840">Pozicija 1 – čelik P91, povećanje 200x</p>	 <p data-bbox="876 795 1339 840">Pozicija 1 – čelik P91, povećanje 200x</p>
 <p data-bbox="212 1330 772 1375">Pozicija 2 – linija staljivanja 1, povećanje 200x</p>	 <p data-bbox="810 1330 1370 1375">Pozicija 2 – linija staljivanja 1, povećanje 200x</p>
 <p data-bbox="247 1861 737 1906">Pozicija 3 – Inconel 625, povećanje 500x</p>	 <p data-bbox="853 1861 1343 1906">Pozicija 3 – Inconel 625, povećanje 500x</p>

Nastavak tablice 25.



Iz dobivenih mikrostrukture vidi se da su mikrostrukture odabranih pozicija kod oba makroizbruska vrlo slične. Područje od najvećeg interesa je mikrostruktura osnovnog materijala čelika P91 i zona utjecaja topline u tom čeliku jer je čelik P91 „najproblematičniji“ za zavarivanje. Kod oba uzorka u osnovnom materijalu čelika P91 primjećena je tipična martenzitna struktura. Osim martenzita pojavljuju se i karbidi koji se talože po granicama zrna. Kada bi se željelo točno odrediti vrste karbida, trebalo bi provesti detaljne metode karakterizacije materijala (npr. EDS analizu). U zoni utjecaja topline uz liniju staljivanja 1, došlo je do promjene u strukturi i vrlo vjerojatno i do promjene kemijskog sastava. Ne vide se

granice zrna, a razlog tome može biti neadekvatno nagrižena površina u ZUT-u. Isti slučaj vidi se i na poziciji 4 kod makroizbruska 1. Ne vide se granice zrna uz samu liniju staljivanja, dok se kod makroizbruska 2 uz liniju staljivanja vide granice zrna. Može se primjetiti da je došlo do pogrubljenja austenitnih zrna uz liniju staljivanja 2, odnosno u ZUT-u čelika X5CrNi18-10 makroizbruska 2.

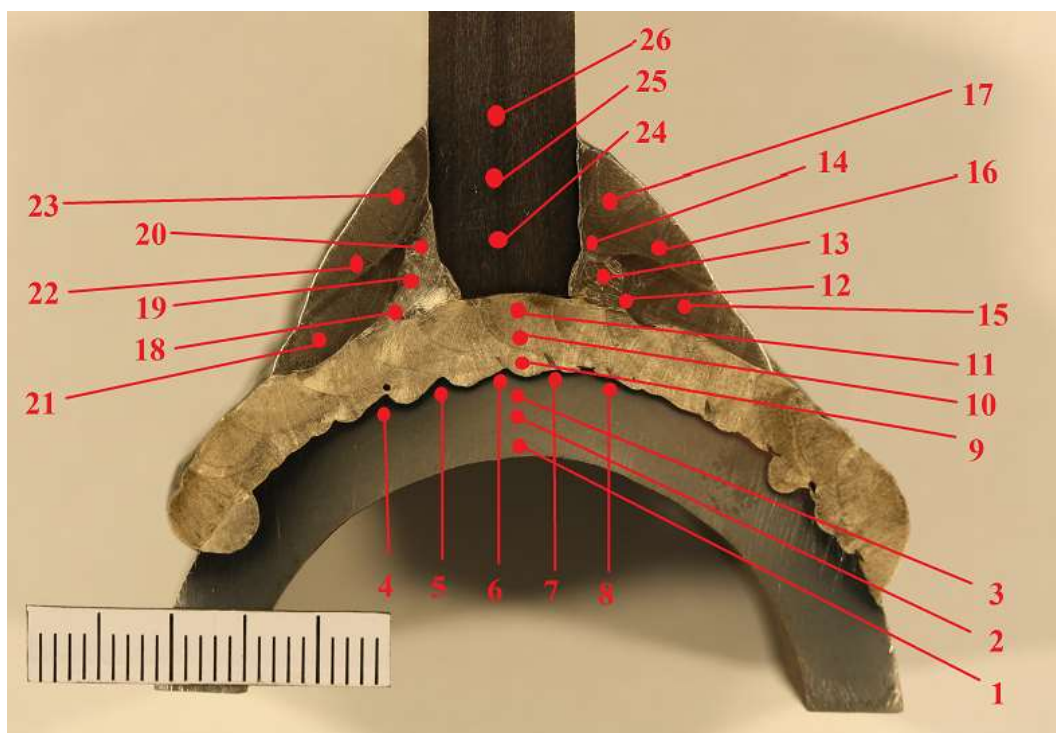
7.5.3. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće izvršeno je Vickersovom metodom (HV10). Ova metoda koristi se za meke i tvrde materijale, a kao penetrator koristi četverostranu istostraničnu dijamantnu piramidu s vršnim kutom od 136° . Za očitavanje rezultata koristi se mjerni mikroskop kojim se očitavaju duljine dijagonala prema čemu se tvrdoća po Vickersu očitava iz tablice. Trajanje opterećenja iznosi oko 10 sekundi. Za potrebe ovog rada, mjerenje tvrdoće HV10 provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje, na uređaju Reicherter. Na slici 53 prikazan je uređaj za mjerenje tvrdoće.



Slika 53. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Mjerenja tvrdoće na oba makroizbruska provedena su prema pozicijama vidljivim na slici 54. Provedeno je 26 mjerenja na svakom makroizbrusku.



Slika 54. Raspored točaka mjerenja tvrdoće

Tablica 26. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV 10

Pozicija mjerenja	Tvrdoća, HV 10	
	Makroizbrusak 1	Makroizbrusak 2
1.	205	206
2.	202	209
3.	202	206
4.	238	243
5.	235	240
6.	249	235
7.	233	233
8.	238	235
9.	258	264
10.	260	258
11.	264	264
12.	232	235
13.	233	228
14.	222	232

Nastavak tablice 26.

15.	206	206
16.	235	209
17.	221	218
18.	232	236
19.	222	221
20.	221	224
21.	236	220
22.	224	230
23.	225	209
24.	245	245
25.	233	240
26.	235	236

Tvrdoće mjerene u pozicijama 1-3 su tvrdoće izmjerene u osnovnom materijalu čelika P91. Pozicije 4-8 predstavljaju tvrdoće u ZUT-u čelika P91. Tvrdoće izmjerene na pozicijama od 9-11 su tvrdoće u navarenom sloju Inconel legure koji je toplinski obrađen zajedno sa čelikom P91. Pozicije od 12-23 predstavljaju tvrdoće u metalu zavara Inconel-a, dok pozicije od 24-26 predstavljaju tvrdoće u osnovnom materijalu čelika X5CrNi18-10. U tablici 27 dane su prosječne izračunate vrijednosti svakog područja.

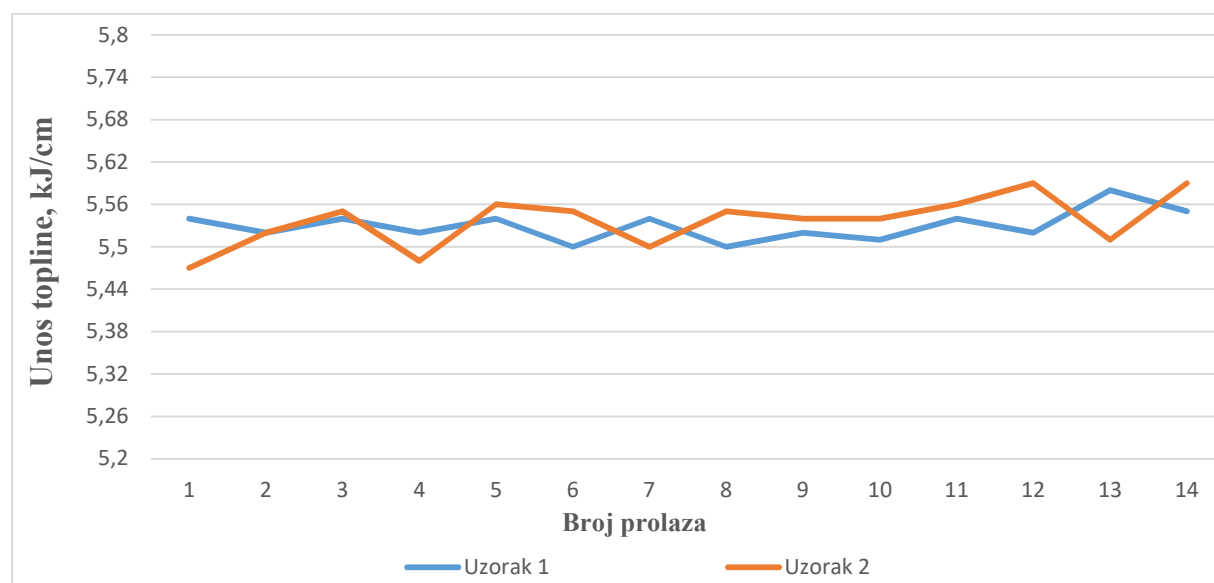
Tablica 27. Prosječne vrijednosti tvrdoća

Područje u zavarenom spoju	Prosječne tvrdoće HV 10	
	Makroizbrusak 1	Makroizbrusak 2
Osnovni materijal-čelik P91	203	207
ZUT u čeliku P91	239	238
Navareni sloj Inconel 625	261	262
Metal zavara Inconel 625	226	222
Osnovni materijal-čelik X5CrNi18-10	238	240

Iz tablice 27 vidi se da su srednje vrijednosti tvrdoća izračunate za makroizbrusak 1 vrlo bliske izračunatim tvrdoćama za makroizbrusak 2.

7.6. Analiza rezultata

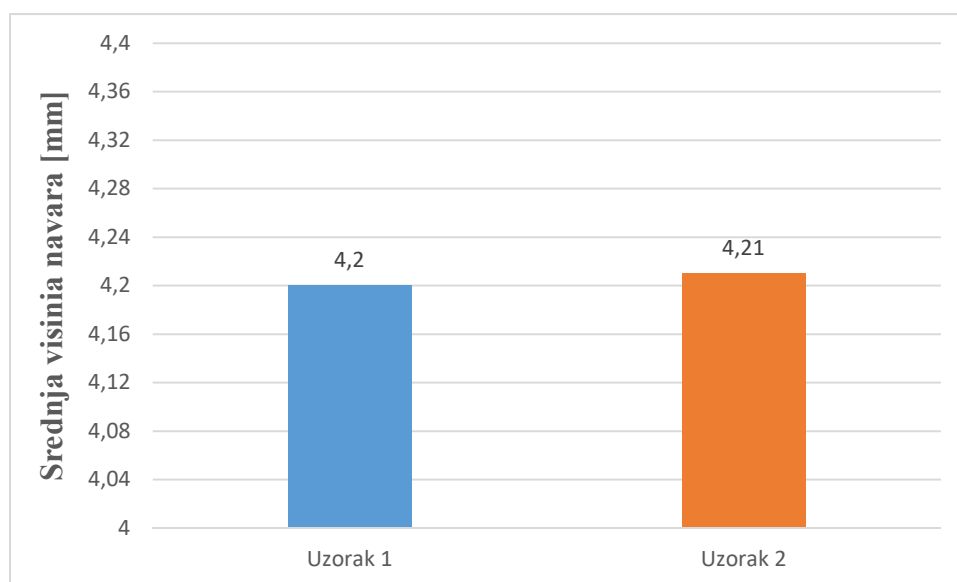
Cilj eksperimenta je bio dobiti kvalitetno zavareni raznorodni spoj između čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika X5CrNi18-10, tj. nastojilo se izbjeći pojavu pukotina koja je moguća ukoliko se ta dva materijala neadekvatno zavaruju. Kada bi se direktno zavarivao austenitni čelik X5CrNi18-10 na cijev martenzitnog čelika P91 vrlo vjerojatno bi došlo do pucanja spoja. Prema tome, bilo je potrebno odabrati ispravnu tehnologiju kod koje bi bio najmanji rizik da ne dođe do pucanja spoja. Odabrana je tehnologija u kojoj je potrebno na cijev čelika P91 najprije navariti sloj Inconel legure. Tako navareni međusloj poslužio je kao osnova za zavarivanje čelika P91 i čelika X5CrNi18-10. Izrada kvalitetnog međusloja bio je glavni zadatak ovog diplomskog rada, a prilikom navarivanja korištena su dva uzorka. Uzorak 1 prije navarivanja nije se predgrijavao, dok je uzorak 2 bio predgrijan na 250 °C. Time se htjelo vidjeti ima li temperatura predgrijavanja ikakvog utjecaja na dobiveni zavareni spoj. Potrebno je bilo dobiti što kvalitetniji i ujednačeniji navareni sloj, a to je postignuto jednakim unosom topline kod svakog prolaza. Na slici 55 prikazan je graf unosa topline kod svakog prolaza navarivanja.



Slika 55. Usporedba unesenih toplina kod oba uzorka

Iz grafa na slici 55 vidi se da unos topline kod oba uzorka nije imao velika odstupanja. Kod oba uzorka se kreće oko 5,5 kJ/cm. Zahvaljujući što jednoličnijem unosu topline na oba uzorka je dobivena približno ista srednja vrijednost visine navarenog sloja. Kod uzorka 1 ona je iznosila 4,20 mm, a kod uzorka 2 4,21 mm, što je neznatno odstupanje. Dobivanju približno iste vrijednosti visine navarenog sloja kod oba uzorka doprinijelo je i pravilno pozicioniranje

uzoraka prilikom svakog novog prolaza. Pištolj za zavarivanje uvijek je na istom mjestu, a cijevi se prilikom svakog novog prolaza namještaju tako da žica udara u sam kraj prethodno navarenog sloja. Analizom dobivenih rezultata dolazi se do zaključka da temperatura predgrijavanja nema nikakvog utjecaja na visinu navarenog sloja. Na slici 56 vidi se graf koji sadrži srednje vrijednosti visina navarenog sloja.

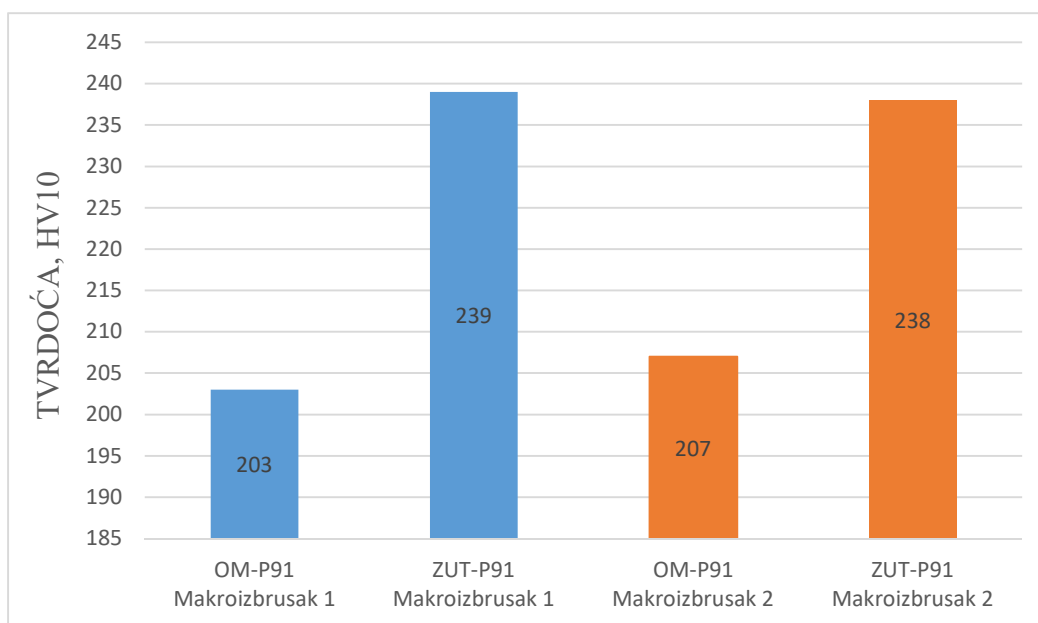


Slika 56. Usporedba srednje visine navarenog sloja

Nakon toplinske obrade uzoraka, na navareni sloj Inconel-a zavarene su ploče od austenitnog čelika. Na slikama 42, 43, 44 i 45 vidi se da ručni MIG postupak uz tehniku njihanja daje ljepši izgled zavarenih spojeva. Korištenjem neutralne tehnike uz automatizirani MIG postupak došlo je i do pogrešaka u zavarenim spojevima što se vidi vizualnom kontrolom. Inconel 625 je takav materijal koji ima slabiju sposobnost kvašenja površine pa se tehnika njihanja pokazala boljom tehnikom zavarivanja navedenim dodatnim materijalom. Također, iz makroizbrusaka vidljivih na slikama 47 i 48 jasno se vidi da se ručnim MIG postupkom uz tehniku njihanja dobivaju ljepši i kvalitetniji zavari s manjim nadvišenjima. Iz makroizbrusaka vidljivo je i da je navareni međusloj Inconela pravilno izveden i da nigdje nema naljepljivanja. Temperatura predgrijavanja uzorka 2 nije imala utjecaja kod navarivanja Inconela jer se prilikom svakog novog prolaza i uzorak 1 zagrijao preko 250 °C. Važnije je bilo održavati međuprolaznu temperaturu kod oba uzorka ispod 300 °C.

Iz dobivenih rezultata mjerenja tvrdoće vidi se da su najveće vrijednosti tvrdoće u cijelom spoju izmjerene u navarenom sloju Inconel legure, i to kod oba uzorka. Najmanju vrijednost tvrdoće

kod oba uzorka pokazuje osnovni materijal čelika P91. U svrhu određivanja kvalitete cijelokupnog zavarenog spoja najveću važnost ima usporedba vrijednosti tvrdoće u osnovnom materijalu čelika P91 i u zoni utjecaja topline, jer je to najkritičnije mjesto. Iz dobivenih mjerenja tvrdoća vidi se da su u ZUT-u čelika P91 tvrdoće veće nego u osnovnom materijalu čelika P91. Slika 57 prikazuje graf srednjih vrijednosti tvrdoća osnovnog materijala čelika P91 i ZUT-a kod oba makroizbruska.



Slika 57. Srednje vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala čelika P91 i njegove zone utjecaja topline kod oba makroizbruska

Iz dobivenih grafova vidi se da je srednja vrijednost tvrdoće osnovnog materijala makroizbruska 1 vrlo slična srednjoj vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala makroizbruska 2. Isto vrijedi i za zone utjecaja topline pa se zaključuje da temperatura predgrijavanja nije imala utjecaja na tvrdoću uzorka 2. Iako je došlo do povećanja tvrdoće u zoni utjecaja topline (kod P91 čelika), razlika u tvrdoći spram osnovnog materijala je u dopuštenim granicama, što znači da je provedena pravilna toplinska obrada. Povećanje tvrdoće u zoni utjecaja topline proizlazi iz promjene strukture i svojstva materijala prilikom zavarivanja. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je provedena pravilna toplinska obrada te se zaključuje da je cijela tehnologija zavarenog spoja ispravno provedena. Napravljen je kvalitetan međusloj u kojem nema pukotina i naljepljivanja, a vrijednosti tvrdoća u najkritičnijem dijelu (ZUT-u čelika P91), malo odstupa od vrijednosti osnovnog materijala što je prihvatljivo.

8. ZAKLJUČAK

Današnja energetska postrojenja zbog što veće iskoristivosti rade na vrlo visokim temperaturama i tlakovima, zbog toga materijali moraju biti postojani za rad u takvim uvjetima. Osnovno svojstvo materijala za rad na visokim temperaturama je da imaju dobru otpornost na puzanje. Martenzitni čelici P91 pokazuju dobru otpornost na puzanje te zbog toga zauzimaju sve veće mjesto u izboru materijala za rad u navedenim uvjetima. Čelici P91 su relativno dobro zavarljivi čelici, ali su skloni pojavi pukotina, stoga je prilikom zavarivanja posebnu pažnju potrebno obratiti na temperaturu predgrijavanja, na pravilno održavanje međuprolazne temperature kao i na naknadnu toplinsku obradu. Zavarivanje čelika P91 je složenije ako je riječ o raznorodno zavarenom spoju.

U posljednje vrijeme su konstrukcije od raznorodnih čeličnih materijala sve popularnije i sve se više koriste, no takve tehnologije zavarivanja raznorodnih čelika su mnogo složenije od zavarivanja čelika iste strukturne klase. Kod raznorodnih spojeva mnogo je zahtjevnije dobiti zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja zbog različitih svojstava materijala (kemijskih, fizikalnih, mehaničkih). Da bi zavar bio kvalitetno izveden potrebno je odabrati prikladne parametre zavarivanja kao i prikladan postupak zavarivanja. Potrebno je paziti na mnogo čimbenika kao što je stupanj protaljivanja, odabir dodatnog materijala i sl. Glavne poteškoće u raznorodno zavarenom spoju mogu nastati zbog difuzije (najčešće ugljika) te zbog zaostalih naprezanja.

U eksperimentalnom dijelu rada cilj je bio dobiti kvalitetno zavareni raznorodni spoj između čelika P91 i visokolegiranog austenitnog čelika X5CrNi18-10, tj. nastojilo se izbjeći pojavu pukotina koja je moguća ukoliko se ta dva materijala neadekvatno zavaruju. Izabrana je tehnologija u kojoj se na cijev čelika P91 navari sloj Inconel 625 legure te dobiveni sloj služi kao osnova za zavarivanje čelika P91 i austenitnog čelika X5CrNi18-10. Tijekom eksperimenta zavarena su dva uzorka. Jedan od uzoraka se predgrijavao prije navarivanja, a drugi nije. Time se htjelo vidjeti ima li temperatura predgrijavanja ikakvog utjecaja na kvalitetu dobivenog spoja, budući da čelik P91 prema brojnim literaturnim podacima zahtijeva obavezno predgrijavanje prije zavarivanja. Nakon izrade međusloja oba uzorka su bila toplinski obrađena te su na sloj Inconel legure zavarene ploče od austenitnog čelika. Izradom makroizbrusaka i analizom dobivenih rezultata da se zaključiti:

- Visina navarenog sloja ne ovisi o temperaturi predgrijavanja. Za jednoliku visinu navara potrebni su jednaki unosi topline, kao i pravilno pozicioniranje uzoraka prilikom svakog novog prolaza (žica za zavarivanje mora udarati u sam kraj prethodno navarenog sloja).
- Iz dobivenih makroizbrusaka vidi se da je međusloj od Inconel materijala navaren bez grešaka (naljepljivanja, pukotina), uz dovoljnu penetraciju. Može se zaključiti da su izabrani ispravni parametri te je pravilno održavana međuprolazna temperatura.
- Inconel 625 prilikom zavarivanja se pokazao kao materijal sa slabijom sposobnošću kvašenja površine te su vizualnom kontrolom uočene pogreške prilikom automatiziranog MIG zavarivanja neutralnom tehnikom. Estetski prihvatljivije zavare dao je ručni MIG postupak uz tehniku njihanja te uz nešto veći unos topline, pa se zaključuje da je tehnika njihanja bolja tehnika od neutralne kod primjene dodatnog materijala Inconel 625.
- Mjerenjem tvrdoća u najkritičnijem dijelu spoja kod oba makroizbruska (osnovni materijal P91 i njegova zona utjecaja topline) vidljiv je porast tvrdoće u ZUT-u, no razlike u tvrdoći spram osnovnog materijala su u dopuštenim granicama. Približno iste vrijednosti tvrdoća su dobivene kod oba uzorka pa se zaključuje da temperatura predgrijavanja nema utjecaja niti na tvrdoću. Također, zaključuje se da je provedena pravilna toplinska obrada budući da nema velike razlike u tvrdoći osnovnog materijala i ZUT-a.

Iako je za čelik P91 gotovo u svakoj literaturi navedeno da je prije zavarivanja obavezno predgrijavanje, u ovom eksperimentu dokazano je da za ovu debljinu stijenke cijevi (6,3 mm) temperatura predgrijavanja nije imala nikakvog utjecaja na kvalitetu krajnje dobivenog spoja. Nije došlo do pojave pukotina kod uzorka koji se nije predgrijavao, a također iz rezultata je vidljivo da temperatura predgrijavanja nije imala niti utjecaj na tvrdoću materijala. Dokazano je da je čelik P91 moguće zavarivati bez predgrijavanja, a da ne dođe do pukotina, no to vrijedi za cijevi tanjih stijenki. Za zavarivanje cijevi debljih stijenki preporuča se predgrijavanje prije zavarivanja. Što se tiče provedenog eksperimenta, kad se sve zajedno sumira, može se reći da su oba spoja kvalitetno izvedena bez pojave pukotina u najkritičnijem dijelu. Navedeni rezultat može se pripisati pravilno odabranoj tehnologiji, parametrima zavarivanja kao i naknadnoj toplinskoj obradi spoja.

9. LITERATURA

- [1] Novosel M., Krumes D.: Željezni materijali - 2.dio: Konstrukcijski čelici, SFSB, Slavonski Brod, 1995.
- [2] <http://www.doosanskodapower.com/en/steam/nuclearpowerplants/>, Nuclear Power Plants (dostupno dana 30.1.2019.)
- [3] Novosel M., Krumes D.: Posebni čelici, SFSB, Slavonski Brod, 1998.
- [4] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Čurković L.: Materijali I, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] Selanec J.: Karakterizacija materijala kućišta vrućih plinova, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [6] Čorić D., Alar Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala – predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [7] Kožuh S.: Specijalni čelici – skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [8] https://www.bssa.org.uk/cms/File/StainlessSteels_at_HighTemperatures_EN.pdf, Stainless Steels at High Temperatures (dostupno dana 29.1.2019.)
- [9] Despotović B., Marsenić T., Samardžić I.: Suvremeni materijali u kotlogradnji i njihova zavarljivost, Zavarivanje: Časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, 2016., br. 59, str. 65-72.
- [10] Despotović B., Marsenić T., Bajić D., Vuherer T., Samardžić I.: Zavarljivost suvremenih 9-12 Cr martenzitnih čelika za komponente u kotlogradnji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2013., str. 5-14.
- [11] http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_englisch/Kesselrohre_ASTM/P91_T91_en_gl.pdf, Alloy steel tubes for high-temperature service (dostupno dana 4.2.2019.)
- [12] <http://cdn.intechweb.org/pdfs/26044.pdf>, Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants (dostupno dana 4.2.2019.)
- [13] <https://bib.irb.hr/datoteka/544625.001-013-sbz2011.pdf>, Instruction of welding and review of steels for power plant equipment and possibility of using HAZ simulation in order improve weld joint quality (dostupno dana 5.2.2019.)
- [14] Žgurić M.: Toplinska obrada zavarenih spojeva, završni rad, FSB, Zagreb, 2015.

- [15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Zona_utjecaja_topline#/media/File:Zona_taljenja.jpg, ZUT (dostupno dana 5.2.2019.)
- [16] Mayr P.: Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels, doktorski rad, Fakultet strojarstva, Graz, 2007.
- [17] <https://docplayer.net/59063031-Povoljne-i-nepovoljne-karakteristike-raznorodnih-zavarenih-spojeva-celika-x10crmoVnb91.html>, Povoljne i nepovoljne karakteristike raznorodnih zavarenih spojeva čelika X10CrMoVNb91 (dostupno dana 10.2.2019.)
- [18] Milović Lj.: Significance of cracks in the heat-affected zone of steels for elevated temperature application, Structural integrity and life, 2008., str. 55-64.
- [19] Barić E.: Zavarljivost martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [20] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>, Zavarivanje i navarivanje visokolegiranih feritnih, martenzitnih i austenitnih čelika, (dostupno dana 11.2.2019.)
- [21] Despotović B., Marsenić T., Samardžić I., Klarić Š.: Iskustva iz primjene čelika P92 u kotlogradnji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2019., str. 9-14.
- [22] B. Mateša, I. Samardžić, M. Dunder, Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena schaeffler-ovog dijagrama, Slavonski Brod, 2011.
- [23] <https://i2.wp.com/thielsch4syte.com/wp-content/uploads/2015/10/dmw.jpg?ssl=1>, (dostupno dana 13.2.2019.)
- [24] Pavić J., Đunder M., Klarić Š., Majić J.: Zavarivanje raznorodnih materijala u izradi kompenzatora, Slavonski Brod, 2011.
- [25] Zidarić K.: Zavarivanje raznorodnih čelika, završni rad, FSB, Zagreb, 2014.
- [26] Horvat M., Bilić M., Kondić V.: Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik 7, 2013., br. 2, str. 132-137.
- [27] <http://mmawtechnique.blogspot.com/2016/05/mmaw-manual-metal-arc-welding-or.html>, MMAW (dostupno dana 17.2.2019.)
- [28] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tig-it-how-a-tig-welder-works-and-when-to-tig-weld>, TIG welding (dostupno dana 17.2.2019.)
- [29] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik 8, 2014., br. 4, str. 426-432.
- [30] Vrbanc M.: Zavarivanje raznorodnih čelika, završni rad, FSB, Zagreb, 2018.

- [31] <http://www.scheblerspecfab.com/processes/mig-welding>, MIG welding (dostupno dana 21.2.2019.)
- [32] <https://www.structint.com/resources/news-and-views-44-spring-2018/dissimilar-metal-welds-in-grade-91-steel/>, Dissimilar Metal Welds in Grade 91 Steel, (dostupno dana 23.2.2019.)
- [33] <http://www.sperkoengineering.com/html/Grade%2091%20R%2010-05.pdf>, Welding „Grade 91“ Alloy Steel, (dostupno dana 23.2.2019.)
- [34] <http://www.weldwire.net/>, Filler Metal (dostupno dana 24.2.2019.)
- [35] <https://www.otc-daihen.de/index.php?id=2585>, Welbee P400 (dostupno dana 4.3.2019)
- [36] <https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/irthermometers/fluke-568>, Fluke 568 IR Termometer (dostupno dana 4.3.2019.)
- [37] http://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14301-Bar-and-Section_34.ashx, AISI 304 (dostupno 4.3.2019.)
- [38] <http://selector.specialmetalswelding.com/products/datash/fm625.pdf>, Inconel filler metal 625, (dostupno dana 4.3.2019.)
- [39] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.
- [40] <http://www.probus.hr/termometri/termometri-kontaktni/5020-0309-termometar-tc-309-detalji.html>, TC309 (dostupno dana 5.3.2019.)

PRILOZI

I. CD-R disc